



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TEMA:

**“Estudio experimental del impacto de tres tipos de aditivos en
el asfalto ecuatoriano y en una mezcla típica”**

AUTORES:

**Ortega Lucero, Álvaro Sebastian
Yachimba Lema, Edwin Javier**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL**

TUTOR:

Ing. Mera Intriago, Walter Antonio Ph.D.

Guayaquil, Ecuador

31 de agosto del 2026

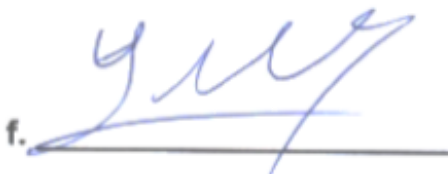


UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por **Álvaro Ortega Lucero y Edwin Yachimba Lema**, como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero civil**.

TUTOR

f. 

Ing. Mera Intriago Walter Antonio, M.Sc.

DIRECTOR DE LA CARRERA

f. 

Ing. Alcívar Bastidas Stefany Esther, Ph.D.

Guayaquil, a los 31 días del mes de agosto del año 2026



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **Ortega Lucero Álvaro y Yachimba Lema Edwin**

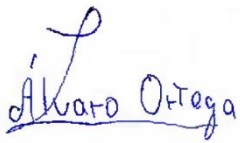
DECLARAMOS QUE:

El Trabajo de Titulación, **Estudio experimental del impacto de tres tipos de aditivos en el asfalto ecuatoriano y en una mezcla típica**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

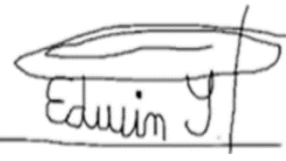
Guayaquil, a los 31 días del mes de agosto del año 2026

EL AUTOR

f. 

Ortega Lucero Álvaro Sebastián

EL AUTOR

f. 

Yachimba Lema Edwin Javier



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

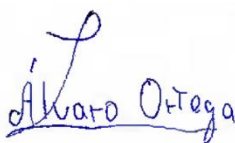
AUTORIZACIÓN

Nosotros, **Ortega Lucero Álvaro y Yachimba Lema Edwin**

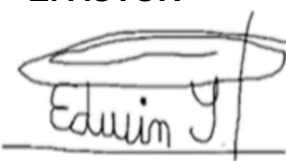
Autorizamos a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Estudio experimental del impacto de tres tipos de aditivos en el asfalto ecuatoriano y en una mezcla típica**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 31 días del mes de agosto del año 2026

EL AUTOR

f. 
Ortega Lucero Álvaro Sebastián

EL AUTOR

f. 
Yachimba Lema Edwin Javier

COMPILATIO



Certificado de análisis
Compilatio Magister+ | UCSG-EC- Universidad Católica de Santiago de Guayaquil

ÁLVARO ORTEGA Y EDWIN YACHIMBA.

ID : 0015d91e2974df28a008311a96f9e57410ba1dc9



7%
Textos sospechosos

Nombre del fichero : ÁLVARO ORTEGA Y EDWIN YACHIMBA..txt
Tamaño del archivo original : 3,81 MB
Número de palabras : 11.646

Depositante : Clara Catalina Glas Cevallos
Fecha de depósito : 6 de septiembre de 2026
Tipo de carga : interface
fecha de fin de análisis : 6 de septiembre de 2026

Resumen (sección 1/2)

Localización de los textos sospechosos en el documento :



Incluido en el porcentaje de textos sospechosos :

Similitudes 1%

Pasajes con similitudes a fuentes encontradas en diferentes colecciones.



Detección de IA 6%

Textos estilísticamente próximos a un texto generado por una IA.
Este índice es un indicador y no una prueba. Comprueba con el autor si domina los conocimientos mencionados en el documento.



Idiomas no reconocidos 0%

Pasajes en los que parte del vocabulario utilizado no forma parte del diccionario de la lengua.
Puede tratarse de un intento del autor de modificar el texto para evitar ser detectado.

No incluido en el porcentaje de textos sospechosos :

Textos entre comillas 4%

Pasajes entre comillas, a menudo indicativos de una cita.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios, quien ha hecho posible que este camino llegue hasta aquí, brindándome salud, bienestar y fortaleza día a día, y guiándome e iluminando mi camino en cada etapa de este proceso.

A mis padres y a mis dos hermanos, por todo el apoyo, amor y confianza que me han brindado a lo largo de mi carrera, así como por los valores y enseñanzas que me han inculcado y que han sido fundamentales para llegar hasta este momento. Gracias por estar siempre presentes y apoyarme a lo largo de este camino; especialmente a mi hermano, por llevarme a la universidad tantas veces y ayudarme de alguna manera siempre que lo he necesitado.

Al Dr. Rolando Vila, al Ing. Walter Antonio Mera y a la Ing. María Fernanda Farah, por haber sido excelentes mentores y por compartir sus conocimientos y experiencia durante el desarrollo de este trabajo.

A mi compañero de tesis, Edwin Yachimba, quien, además de ser mi compañero durante este proyecto, ha sido mi aliado y amigo a lo largo de toda la carrera. Gracias por compartir conmigo no solo el esfuerzo y los desafíos de este proceso, sino también tantos momentos que hicieron que este camino fuera mucho más llevadero.

A mis amigos Kamila Arguello, María Saavedra, Eduardo Alcívar, Chenier Zambrano, Sebastián Franco, Juan Andrade, Jacob Rodríguez y a todos aquellos que, de una u otra manera, me acompañaron a lo largo de este recorrido. Gracias por las horas de estudio, las risas, las experiencias que compartimos, que sin duda quedarán como recuerdos inolvidables para mí.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento por haber sido parte de este camino y logro.

Álvaro Ortega Lucero

En primer lugar, agradezco a Dios por un día más de vida y por brindarme salud a lo largo de toda mi vida y por guiar mis pasos durante toda esta etapa universitaria hasta permitirme alcanzar esta meta.

También agradezco al Ing. Walter Mera Intriago por ser mi tutor y guía durante el trabajo de investigación. Además, agradezco al Dr. Rolando Vila, que a pesar de ser el oponente de tesis, siempre brindó apoyo con sus conocimientos y experiencia a mi compañero de tesis y a mí durante estos 4 meses.

También agradezco a la Ing. María Fernanda Farah por su paciencia y apoyo con los ensayos del laboratorio. Además, agradezco a mi compañero de tesis, Álvaro Ortega, por brindar su compañerismo, lealtad y tiempo durante nuestro trabajo de investigación.

Por último, quiero agradecer a mis amigos del colegio y a todos los que he conocido a lo largo de mi carrera universitaria; de manera especial gracias por su apoyo: Paula, Salomé, Puma, Majo, Kami, Eduardo, Jacob, Joshua, los tres chiflados de la U y a los chicos de ayudantías de Estática y Resistencia de materiales I.

Edwin Yachimba Lema

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres y familiares que han brindado apoyo constante y confianza incondicional durante todo este camino. Gracias por acompañarme, motivarme y estar presentes en cada etapa de este proceso.

Álvaro Ortega Lucero

Este trabajo va dedicado a mis padres y mi hermana, que han sido los cimientos de mi vida, brindándome apoyo de todas las maneras posibles. Sin ellos yo no tendría la oportunidad de culminar mi carrera universitaria.

Edwin Yachimba Lema



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

Ing. Federico von Buchwald de Janon, Ph.D.

DECANO

f. _____

Ing. Nancy Varela Terrenos, Ph.D.

COORDINADOR DEL ÁREA

f. _____

Ing. Rolando Vila Romaní, Ph.D.

OPONENTE

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I	2
1 Introducción	2
1.1 Antecedentes	2
1.2 Razones que motivaron al estudio	2
1.3 Justificación del tema.....	2
1.4 Objetivos	3
1.4.1 Objetivo General	3
1.4.2 Objetivo Específicos	3
1.5 Alcance	3
1.6 Metodología	3
CAPÍTULO II	4
2 Características de las mezclas asfálticas y aditivos.....	4
2.1 Cemento asfaltico	4
2.1.1 Viscosidad	5
2.1.2 Punto de inflamación	6
2.1.3 Gravedad específica.....	7
2.1.4 Ensayo de penetración	8
2.1.5 Ensayo de punto de ablandamiento	8
2.1.6 Envejecimiento en horno de película delgada (RTFOT)	9
2.1.7 Ductilidad	10
2.1.8 Recuperación elástica utilizando ductilímetro.	10
2.1.9 Recuperación elástica por torsión.....	11
2.2 Modificadores de Asfalto.....	12
2.2.1 Aditivo rejuvenecedor	12
2.2.2 Aditivo suavizante	12
2.2.3 Polímero	13
2.3 Agregados minerales	14
2.3.1 Características de los agregados en mezclas asfálticas.....	14
2.4 Mezclas Asfálticas	16
2.4.1 Parámetros volumétricos	16
2.4.2 Parámetros de resistencia	19
2.4.3 Pruebas de desempeño con el Nottingham Asphalt Tester (NAT)	20

CAPÍTULO III	25
3 Estudio experimental.....	25
3.1 Metodología de trabajo	25
3.1.1 Determinación de la dosificación optima.....	25
3.1.2 Proceso de mezclado	26
3.1.3 Características de los agregados usados en el diseño de mezcla	27
3.1.4 Proceso de Envejecimiento de las briquetas	27
3.2 Distribución de briquetas	28
CAPÍTULO IV	29
4 Resultados y análisis de resultados.....	29
4.1 Resultados del método Marshall.....	29
4.2 Parámetros volumétricos de briquetas.....	33
4.3 Resultados del ensayo del Módulo de rigidez.....	35
4.3.1 Resumen de resultados	39
4.4 Resultados de fatiga	39
4.4.1 Resumen de resultados	42
4.5 Resultados de creep	43
4.5.1 Resumen de resultados	47
Conclusiones y Recomendaciones	48
Conclusiones	48
Recomendaciones	49
Referencias	50
Anexos	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Fuentes principales para la obtención de cementos asfálticos.....	4
Tabla 2. Clasificación por viscosidad de los asfaltos ecuatorianos	5
Tabla 3. Especificaciones técnicas y propiedades físicas del ReLIXER	12
Tabla 4. Especificaciones técnicas y propiedades físicas del NuMIXER.	13
Tabla 5. Especificaciones técnicas y propiedades físicas del PGXpand.....	13
Tabla 6. Exigencias para las pruebas de control del agregado mineral	15
Tabla 7. Límites granulométricos	17
Tabla 8. Resultados de viscosidad y ductilidad entre ligante asfáltico convencional y aditivado	25
Tabla 9. Resultados de ensayos realizados al asfalto modificado con cada uno de los aditivos con su porcentaje óptimo	26
Tabla 10. Porcentajes de dosificación de los materiales pétreos	29
Tabla 11. Resumen de los resultados Marshall	30
Tabla 12. Parámetros volumétricos del asfalto de referencia.....	33
Tabla 13. Parámetros volumétricos del asfalto aditivado con ReLIXER.....	33
Tabla 14. Parámetros volumétricos del asfalto aditivado con NuMIXER.....	34
Tabla 15. Parámetros volumétricos del asfalto aditivado con PGXpand	34
Tabla 16. Módulo de rigidez de las muestras de referencia (Original - ACP)	35
Tabla 17. Módulo de rigidez de las muestras de referencia (Envejecido - ALP)	35
Tabla 18. Módulo de rigidez de las muestras con ReLIXER (Original – ACP)	36
Tabla 19. Módulo de rigidez de las muestras con ReLIXER (Envejecido - ALP)	36
Tabla 20. Módulo de rigidez de las muestras con NuMIXER (Original - ACP)	37
Tabla 21. Módulo de rigidez de las muestras con NuMIXER (Envejecido - ALP)	37
Tabla 22. Módulo de rigidez de las muestras con PGXpand (Original - ACP)	38
Tabla 23. Módulo de rigidez de las muestras con PGXpand (Envejecido - ALP).....	38
Tabla 24. Resultados del ensayo a fatiga de las muestras de referencia	39
Tabla 25. Resultados del ensayo a fatiga de las muestras con ReLIXER.....	40
Tabla 26. Resultados del ensayo a fatiga de las muestras con NuMIXER.....	41
Tabla 27. Resultados del ensayo a fatiga de las muestras con PGXpand	41
Tabla 28. Resultados del ensayo Creep de las muestras de referencia (Original – ACP).....	43

Tabla 29. Resultados del ensayo Creep de las muestras de referencia (Envejecido – ALP)	43
Tabla 30. Resultados del ensayo Creep de las muestras con ReLIXER (Original – ACP).....	44
Tabla 31. Resultados del ensayo Creep de las muestras con ReLIXER (Envejecido – ALP)	44
Tabla 32. Resultados del ensayo Creep de las muestras con NuMIXER (Original – ACP).....	45
Tabla 33. Resultados del ensayo Creep de las muestras con NuMIXER (Envejecido – ALP)	45
Tabla 34. Resultados del ensayo Creep de las muestras con PGXpand (Original – ACP).....	46
Tabla 35. Resultados del ensayo Creep de las muestras con PGXpand (Envejecido – ALP)	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Viscosímetro de brookfield	6
Figura 2. Ensayo de punto de inflamación	7
Figura 3. Ensayo de gravedad específica	7
Figura 4. Ensayo de penetración	8
Figura 5. Ensayo del punto de ablandamiento	9
Figura 6. Ensayo del Horno Rotatorio de Película Delgada	9
Figura 7. Ensayo de ductilidad	10
Figura 8. Ensayo de recuperación elástica	11
Figura 9. Ensayo de recuperación elástica por torsión.....	11
Figura 10. Registro de datos para módulo de rigidez bajo deformación controlada en el equipo NAT NU-10	21
Figura 11. Registro de datos para módulo de rigidez bajo esfuerzo controlado en el equipo NAT NU-10	22
Figura 12. Registro de datos para fatiga en el equipo NAT NU-10	23
Figura 13. Registro de datos para creep en el equipo NAT NU-10	24
Figura 14. Distribución de las briquetas utilizadas	28
Figura 15. Curva granulométrica de diseño para la mezcla asfáltica	29
Figura 16. Estabilidad máxima - Diseño Marshall	30
Figura 17. Flujo máximo - Diseño Marshall	30
Figura 18. Densidad máxima - Diseño Marshall.....	31
Figura 19. Vacíos en el agregado mineral - Diseño Marshall.....	31
Figura 20. Vacíos de aire - Diseño Marshall	32
Figura 21. Vacíos rellenos de asfalto - Diseño Marshall	32
Figura 22. Comparación del módulo de rigidez a 20 °C en mezclas asfálticas original (envejecimiento a corto plazo) y envejecidas (envejecimiento a largo plazo) con diferentes aditivos	39
Figura 23. Gráfico de los ensayos a fatiga de las briquetas de referencia	40
Figura 24. Gráfico de los ensayos a fatiga de las briquetas con ReLIXER	40
Figura 25. Gráfico de los ensayos a fatiga de las briquetas con NuMIXER	41
Figura 26. Gráfico de los ensayos a fatiga de las briquetas con PGXpand.....	42
Figura 27. Curvas de fatiga de las briquetas aditivadas y de referencia	42
Figura 28. Gráfico de barras de los resultados de Creep.....	47

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Resultados de Módulo de rigidez obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica de referencia con envejecimiento a corto plazo.	52
Anexo 2. Resultados de Módulo de rigidez obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica de referencia con envejecimiento a largo plazo.	54
Anexo 3. Resultados de Módulo de rigidez obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica aditivada con ReLIXER con envejecimiento a corto plazo.	56
Anexo 4. Resultados de Módulo de rigidez obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica aditivada con ReLIXER con envejecimiento a largo plazo.	58
Anexo 5. Resultados de Módulo de rigidez obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica aditivada con NuMIXER con envejecimiento a corto plazo.	60
Anexo 6. Resultados de Módulo de rigidez obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica aditivada con NuMIXER con envejecimiento a largo plazo.	62
Anexo 7. Resultados de Módulo de rigidez obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica aditivada con PGXpand con envejecimiento a corto plazo.	64
Anexo 8. Resultados de Módulo de rigidez obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica aditivada con PGXpand con envejecimiento a largo plazo.	66
Anexo 9. Resultados de fatiga obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica de referencia con envejecimiento a largo plazo.	68
Anexo 10. Resultados de fatiga obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica aditivada con ReLIXER con envejecimiento a largo plazo.	71
Anexo 11. Resultados de fatiga obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica aditivada con NuMIXER con envejecimiento a largo plazo.	74
Anexo 12. Resultados de fatiga obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica aditivada con PGXpand con envejecimiento a largo plazo.	77
Anexo 13. Resultados de CREEP obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica de referencia con envejecimiento a corto plazo.	80
Anexo 14. Resultados de CREEP obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica de referencia con envejecimiento a largo plazo.	82
Anexo 15. Resultados de CREEP obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica aditivada con ReLIXER con envejecimiento a corto plazo.	84

Anexo 16. Resultados de CREEP obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica aditivada con ReLIXER con envejecimiento a largo plazo.....	86
Anexo 17. Resultados de CREEP obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica aditivada con NuMIXER con envejecimiento a corto plazo.....	88
Anexo 18. Resultados de CREEP obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica aditivada con NuMIXER con envejecimiento a largo plazo.....	90
Anexo 19. Resultados de CREEP obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica aditivada con PGXpand con envejecimiento a corto plazo.	92
Anexo 20. Resultados de CREEP obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica aditivada con PGXpand con envejecimiento a largo plazo.	94

Resumen

El envejecimiento del cemento asfáltico proveniente de la Refinería de Esmeraldas genera problemas de durabilidad y agrietamiento prematuro en los pavimentos ecuatorianos. El presente trabajo de titulación tuvo como objetivo valorar experimentalmente la incidencia de tres aditivos: un rejuvenecedor (ReLIXER), un suavizante (NuMIXER) y un polímero (PGXpand), sobre el comportamiento de una mezcla asfáltica de referencia. El trabajo experimental inició con el diseño de una mezcla mediante el método Marshall, obteniendo un contenido de asfalto del 5,55%. Posteriormente, se confeccionaron 60 briquetas distribuidas en los cuatro casos de estudio, las cuales fueron sometidas a envejecimiento a corto y largo plazo. El desempeño se evaluó mediante ensayos de módulo de rigidez, deformación permanente bajo compresión cíclica uniaxial a 40 °C y fatiga a 20 °C, utilizando el equipo NAT. Los resultados indicaron que tanto el ReLIXER como el NuMIXER redujeron la rigidez de la mezcla, mientras que el PGXpand la incrementó. En cuanto a la deformación permanente, el ReLIXER y el PGXpand redujeron la susceptibilidad al ahuellamiento manteniéndose por debajo del umbral del 1%, mientras que NuMIXER mostró mayor susceptibilidad a la deformación. Finalmente, el análisis de fatiga aplicado únicamente en las muestras envejecidas a largo plazo demostró que las mezclas modificadas mejoraron el comportamiento de la mezcla asfáltica de referencia frente a cargas cíclicas, destacando el NuMIXER al soportar el mayor número de ciclos antes de la falla. Se concluye que estos aditivos representan una alternativa viable para mejorar el desempeño y contrarrestar las patologías del asfalto local.

Palabras clave: *Asfalto ecuatoriano, rejuvenecedor, suavizante, polímero, NAT, deformación permanente, fatiga.*

Abstract

Aging of asphalt cement from the Esmeraldas Refinery causes durability problems and premature cracking in Ecuadorian pavements. The objective of this degree thesis was to experimentally evaluate the incidence of three additives: a rejuvenator (ReLIXER), a softener (NuMIXER), and a polymer (PGXpand), on the performance of a reference asphalt mixture. The experimental work began with the design of a mixture using the Marshall method, obtaining an asphalt content of 5.55%. Subsequently, 60 briquettes were prepared and distributed across the four study cases, which were subjected to short- and long-term aging. Performance was evaluated through stiffness modulus, permanent deformation under uniaxial cyclic compression at 40 °C, and fatigue tests at 20 °C, using NAT equipment. The results indicated that both ReLIXER and NuMIXER reduced the stiffness of the mixture, whereas the PGXpand increased it. Regarding permanent deformation, ReLIXER and PGXpand reduced susceptibility to rutting, remaining below the 1% threshold, while NuMIXER showed higher susceptibility to deformation. Finally, the fatigue analysis applied solely to long-term aged samples demonstrated that the modified mixtures improved the performance of the reference asphalt mixture under cyclic loading, with NuMIXER standing out by supporting the highest number of cycles before failure. It is concluded that these additives represent a viable alternative to improve performance and counteract the defects of local asphalt.

Keywords: *Ecuadorian asphalt, rejuvenator, softener, polymer, NAT, permanent deformation, fatigue.*

CAPÍTULO I

1 Introducción

1.1 Antecedentes

Las mezclas asfálticas utilizadas para pavimentar calles están expuestas a diversos factores que provocan patologías como agrietamientos y deformaciones permanentes. En este contexto, la industria de la construcción vial a nivel internacional ha impulsado el uso de aditivos y polímeros modificadores como una alternativa para mejorar ciertos comportamientos del asfalto.

El uso de la tecnología de los aditivos y polímeros se evidenció en los carriles exclusivos de la Ecovía de Quito, donde se empleó un polímero como modificador del asfalto. Además, a finales de los noventa en Quito se construyó el primer tramo experimental de pavimento empleando asfaltos mejorados con polímeros SBS.

El asfalto ecuatoriano, proveniente de la Refinería de Esmeraldas, presenta una alta rigidez al envejecerse a corto y largo plazo, generando una tendencia al agrietamiento prematuro en las mezclas que se fabrican. El empleo de ciertos aditivos, como rejuvenecedores y suavizantes permiten precisamente mejorar este problema, que ya ha sido tratado en algunos trabajos en el Laboratorio de Carreteras de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. Sin embargo, los productos que se utilizarán en este estudio son novedosos en el mercado internacional y ameritan su valoración con nuestro asfalto.

1.2 Razones que motivaron al estudio

El periodo de diseño de las carreteras pavimentadas con asfalto, proveniente de la refinería de Esmeraldas, en la mayoría de los casos llegan a la mitad o menos de lo esperado. Esto se debe al impacto del envejecimiento en el asfalto, el cual genera problemas como la piel de cocodrilo, fisuras longitudinales y baches por durabilidad. Por esta razón, se busca aplicar el uso de un rejuvenecedor, un ablandador y un polímero mediante ensayos experimentales que permitan determinar si se presenta o no una mejoría en el comportamiento y desempeño de las mezclas asfálticas.

1.3 Justificación del tema

En Ecuador, las investigaciones sobre el uso de aditivos en mezclas asfálticas son muy escasas; inclusive, no se comercializa el uso de rejuvenecedores ni ablandadores a nivel nacional. Por ende, investigar el uso de aditivos que mejoren la calidad de las mezclas asfálticas permitirá desarrollar soluciones viables para la

construcción o rehabilitación de carreteras en el país, mejorando su comportamiento ante los problemas de deterioro.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Valorar experimentalmente la incidencia de tres tipos de aditivos: un rejuvenecedor, un suavizante y un polímero en la calidad del cemento asfáltico AC 20 procedente de la Refinería de Esmeraldas, y sobre el comportamiento de una mezcla de referencia sin y con envejecimiento, a través de pruebas experimentales, lo que permitirá estimar sus ventajas y desventajas, así como sus implicaciones en el futuro comportamiento de la mezcla.

1.4.2 Objetivo Específicos

1. Determinar el porcentaje de aditivos a emplear a partir de pruebas experimentales y/o recomendaciones.
2. Diseñar una mezcla asfáltica densa de referencia con materiales aluviales por el método Marshall, con el asfalto procedente de Esmeraldas sin aditivos.
3. Preparar mezclas asfálticas sin y con envejecimiento, con asfaltos modificados con cada uno de los aditivos.
4. Realizar pruebas de comportamiento en el equipo NAT a las mezclas confeccionadas, que permitan una comparación del efecto de los aditivos empleados.
5. Hacer recomendaciones respecto al uso de los aditivos empleados y sus implicaciones.

1.5 Alcance

El trabajo que se propone, por su objeto de estudio y los objetivos planteados, es de alcance local y nacional. Los resultados que se obtengan serán de interés y posible aplicación por el M.I. Municipio de Guayaquil, el MIT, consultores y técnicos en general vinculados a la temática.

1.6 Metodología

Se realizará con la aplicación del método general de análisis y síntesis. Se hará estudio bibliográfico, procesamiento de datos experimentales y aplicación de parámetros estadísticos.

CAPÍTULO II

2 Características de las mezclas asfálticas y aditivos.

2.1 Cemento asfáltico

De manera general, el cemento asfáltico es un material bituminoso de color negro, con composición compleja y naturaleza hidrocarbonada, que posee propiedades adhesivas y aglomerantes. Además, el asfalto es un material semisólido característico por sus excelentes propiedades adhesivas, lo que permite convertirse en el material más común para pavimentos (Yuan et al., 2021).

El cemento asfáltico se puede obtener de diferentes fuentes, en la tabla 1 se puede observar algunas de estas:

Tabla 1. Fuentes principales para la obtención de cementos asfálticos.

FUENTES PRINCIPALES DE OBTENCIÓN DE CEMENTOS ASFÁLTICOS				
FUENTE	ORIGEN	CARACTERÍSTICAS	EJEMPLO	ILUSTRACIÓN
Asfalto Natural.	Se encuentra en depósitos naturales subterráneos.	Consiste en mezclas de cemento asfáltico minerales y otros componentes orgánicos.	El Lago Asfáltico de La Brea en Trinidad y Tobago.	
Asfaltita.	También conocida como "cemento asfáltico sólido" o "mastoquita", la asfaltita es una variedad de asfalto natural.	Es más sólida que otros tipos de cemento asfáltico natural y contiene un alto porcentaje de asfaltenos.	Se encuentra en depósitos en lugares como el Lago Guanoco en Venezuela, Colombia y Guyana entre otros.	
Asfalto de Refinería.	Proviene como subproducto del proceso de refinación de petróleo.	Se obtiene de la destilación de residuos pesados de petróleo.	Ampliamente utilizado en la fabricación de mezclas asfálticas.	

Nota. Tomado de Introducción a los cementos y ligantes asfálticos: caracterización, reología y producción (p. 23), por L. G. Loría-Salazar, J. M. Cuadrado-Valbuena, R. E. Villegas-Villegas y E. A. Castillo-Camarena, 2024.

Por lo general se trabaja con asfaltos de refinería; en Ecuador se utiliza el cemento asfáltico proveniente de la Refinería de Esmeraldas, para la construcción de pavimentos flexibles. Dicho material se lo extrae directamente del refinamiento de petróleo, el cual pasa por un proceso de destilación para obtener una consistencia semisólida. Varias investigaciones demostraron que el asfalto ecuatoriano sufre problemas de durabilidad. Dicho problema se debe al envejecimiento a prematuro y

a largo plazo que tiene el asfalto durante el proceso de mezclado, almacenaje, transporte y período de servicio (Mera, 2018).

Para el control de calidad de los cementos asfálticos se debe considerar las exigencias del “Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización (INEN, 2014), ver tabla 2.

Tabla 2. Clasificación por viscosidad de los asfaltos ecuatorianos

Ensayo	Unidad	Grado de Viscosidad										Norma de ensayo
		AC-6		AC-10		AC-20		AC-30		AC-42		
		Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	
Viscosidad absoluta, 60 °C	Pa s	60 ± 20		100 ± 20		200 ± 40		300 ± 60		420 ± 60		ASTMD 2171
Viscosidad cinemática, 135 °C	mm ² s ⁻¹	175	--	250	--	300	--	350	--	400	--	ASTMD 2170
Punto de Inflamación	°C	177	--	219	--	232	--	232	--	232	--	NTE INEN 808
w, Solubilidad en tricloroetileno, ^c	%	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	NTE INEN 915
Gravedad específica 25 °C/25 °C		Informe		Informe		Informe		Informe		Informe		ASTMD70
Índice de Penetración ^B		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		ASTM D5/D5M
Residuo de ensayos de película fina en horno rotatorio:												
Viscosidad, 60 °C	Pa s	--	300	--	500	--	800	--	1 200	--	2 000	ASTMD 2171
Cambio de masa,	% w/w	--	1,5	--	1,0	--	1,0	--	1,0	--	1,0	ASTMD 2872
Ductilidad ^A , 25 °C [77 °F], 5 cm/min	cm	100	--	75	--	50	--	40	--	25	--	NTE INEN 916
^A Si la ductilidad es menor a 100, el material debe ser aceptado, solo si la ductilidad a 15,5 °C es mínimo 100 a una velocidad de tiro de 5 cm/min.												
^B Índice de penetración = $\frac{1952-500 \log pen-20 SP}{50 \log pen-SP-120}$												
donde:												
pen = penetración a 25 °C, 100 g, 5 s SP = punto de ablandamiento (°C) ASTM D36												
^C Solubilidad en bromuro de propilo N puede ser un método alternativo a la solubilidad en TCE.												

Nota. Tomado de INEN, 2014.

2.1.1 Viscosidad

La viscosidad es la relación entre el esfuerzo de corte aplicado y la gradiente de velocidad de deformación. La viscosidad dinámica o absoluta se mide en pascal-segundo (Pa-s).

Una manera de medir la viscosidad dinámica es mediante el viscosímetro de cilindro rotacional coaxial tipo Brookfield. Este método de prueba esta descrito en la normativa ASTM D4402. El fundamento del ensayo consiste en determinar el torque necesario para hacer girar un husillo de paletas de brookfield sumergido en el ligante a una

velocidad angular constante y a temperatura controlada. Se realiza un barrido de temperaturas desde 60°C hasta más de 135°C.

Figura 1. Viscosímetro de brookfield



La viscosidad cinemática puede medirse en unidades de m^2/s , mm^2/s o centistoke. La relación entre la viscosidad dinámica ($\text{Pa}\cdot\text{s}$) y la densidad del betún (kg/m^3) permite determinar la viscosidad cinemática de un betún.

$$\text{Viscosidad cinemática} = \text{Viscosidad dinámica} \div \text{Densidad}$$

2.1.2 Punto de inflamación

El punto de inflamación corresponde a la temperatura mínima a la cual los vapores emitidos por el ligante asfáltico se encienden momentáneamente en presencia de una fuente de ignición. Este ensayo permite evaluar la seguridad durante las operaciones de calentamiento, mezcla y manipulación del asfalto. Generalmente se determina mediante el método de copa abierta Cleveland, descrito en la norma ASTM D92.

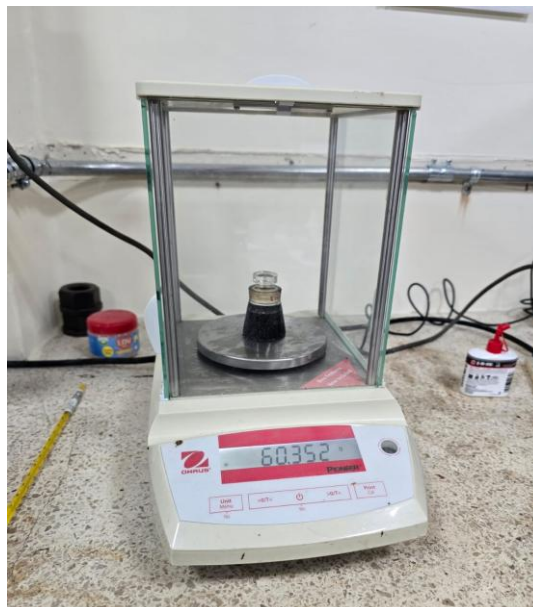
Figura 2. Ensayo de punto de inflamación



2.1.3 Gravedad específica

La gravedad específica es la relación entre la densidad del ligante asfáltico a 25°C y la densidad del agua a una temperatura de referencia (Alcívar y Rosero, 2025). Esta propiedad es importante para realizar conversiones entre masa y volumen, así como para determinar parámetros volumétricos en el diseño de mezclas asfálticas. Su determinación se realiza conforme a la norma ASTM D70.

Figura 3. Ensayo de gravedad específica



2.1.4 Ensayo de penetración

La penetración se define como la distancia recorrida por la aguja dentro del asfalto y se mide en decimilímetro (dmm). De manera general, valores altos de penetración representa asfaltos más blandos a comparación de valores bajos de penetración que representa asfaltos más rígidos.

El ensayo de penetración consiste en penetrar una aguja normalizada bajo condiciones controladas de carga, tiempo y temperatura. Este ensayo se realiza generalmente a 25 °C, aplicando una carga de 100 g durante 5 s, según la norma ASTM D5.

Figura 4. Ensayo de penetración



2.1.5 Ensayo de punto de ablandamiento

El punto de ablandamiento corresponde a la temperatura a la cual el ligante asfáltico fluye bajo una carga determinada al calentarse (ASTM International, 2014). Este parámetro permite evaluar el comportamiento del asfalto frente a altas temperaturas de servicio (Alcivar y Rosero, 2025).

El ensayo se determina mediante el método de “anillo y bola” que esta normalizado con la norma ASTM D36. Este ensayo consiste en una bola de acero que se coloca sobre una muestra de asfalto contenida en un anillo de latón que luego se suspende en un baño de agua. Se registra la temperatura del agua en el momento en el que el asfalto y la bola de acero tocan una placa base a 25 mm por debajo del anillo.

Figura 5. Ensayo del punto de ablandamiento



2.1.6 Envejecimiento en horno de película delgada (RTFOT)

El ensayo Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) simula el envejecimiento a corto plazo que experimenta el ligante asfáltico durante los procesos de producción, mezclado y colocación de la mezcla asfáltica. El procedimiento evalúa los cambios en las propiedades físicas del ligante ocasionados por la oxidación y la pérdida de componentes volátiles. Este ensayo se encuentra descrito en la norma ASTM D2872.

Figura 6. Ensayo del Horno Rotatorio de Película Delgada



2.1.7 Ductilidad

La ductilidad es la capacidad del ligante asfáltico para deformarse bajo esfuerzos de tracción antes de producirse la rotura. Esta propiedad está relacionada con la cohesión y flexibilidad del material, siendo un indicador de su capacidad para resistir agrietamientos.

La prueba de ductilidad mide la distancia a la que una muestra del asfalto podía ser elongada antes de romperse bajo condiciones específicas (ASTM International, 2017). El ensayo consiste en moldear muestras de asfalto en forma de “mancuernas”, se sumerge en un baño de agua y se estira a una velocidad constante de 50 mm por minuto hasta que ocurre la ruptura. Este ensayo se encuentra descrito en la norma ASTM D113.

Figura 7. Ensayo de ductilidad



2.1.8 Recuperación elástica utilizando ductilímetro.

La recuperación elástica es la capacidad que tiene un ligante asfáltico para retornar a su forma original al ser sometido a una deformación por tracción. Este ensayo ayuda a evaluar la elasticidad y resiliencia que son indicadores claves para los ligantes modificados con polímeros.

La prueba mide el porcentaje de elongación recuperado por la muestra tras ser estirada y cortada bajo condiciones estandarizadas. El ensayo consiste en moldear el ligante asfáltico en un molde de ductilidad con cintura estrecha, este debe sumergirse en agua a 25 °C y estirarlo a una velocidad constante de 50 mm por minuto hasta alcanzar una elongación de 20 cm. En este momento se debe cortar la probeta a la mitad, se deja reposar en el agua durante 60 minutos y posteriormente medir la

distancia final para calcular el porcentaje de recuperación. Este ensayo se encuentra descrito en la norma ASTM D6084.

Figura 8. Ensayo de recuperación elástica



2.1.9 Recuperación elástica por torsión.

La prueba mide el porcentaje del ángulo recuperado por la muestra tras imponerle un giro de 180° y permitir su recuperación libre. El ensayo consiste en verter la muestra de asfalto en un recipiente cilíndrico donde se sumerge un cilindro metálico central. El conjunto se acondiciona en un baño de agua a una temperatura constante de 25 °C. Posteriormente, utilizando una barra con escala graduada, se hace girar el cilindro 180° para generar una deformación torsional y se libera inmediatamente. Se debe esperar 30 minutos en el agua a 25 °C y se toma la lectura del ángulo recuperado para calcular el porcentaje de recuperación elástica por torsión. Este ensayo se encuentra descrito en la norma MTC E320.

Figura 9. Ensayo de recuperación elástica por torsión



Nota. Tomado de *Aparato de Recuperación Elástica por Torsión para Asfaltos*

Modificados [Fotografía], por SISTEQ Control, s.f.,

(<https://www.sisteqcontrol.com/productos/aparato-recuperacion-elastica-torsion-asfaltos-modificados-asf0040e109>).

2.2 Modificadores de Asfalto

2.2.1 Aditivo rejuvenecedor

Los rejuvenecedores son aditivos utilizados para recuperar parte de las propiedades del asfalto envejecido. En el presente trabajo se utilizó un producto llamado ReLIXER desarrollado por Sripath Technologies. Está compuesto por una mezcla de bioaceites de origen renovable cuya función principal es restaurar las propiedades del ligante asfáltico envejecido, reduciendo su rigidez y mejorando su flexibilidad (Sripath Technologies, 2022).

Tabla 3. Especificaciones técnicas y propiedades físicas del ReLIXER

Propiedad	Valor Típico
Humedad (Horno de Vacío)	2%
Punto de Inflamación	> 280 °C (> 536 °F)
Densidad	0.9 kg/litro (7.5 lb/gal)
Viscosidad a 24 °C (75 °F)	0.05 Pa·s (50 cP)
Insolubles	1%
Índice de Yodo (Iodine Value)	115

Nota. Tomado de Sripath Technologies, 2022.

2.2.2 Aditivo suavizante

Los suavizantes son aditivos empleados para reducir la viscosidad del ligante asfáltico, lo que facilita el manejo, mezcla y compactación de las mezclas asfálticas. En el presente trabajo de investigación se utilizó el producto NuMIXER, desarrollado por la empresa Sripath Technologies, este producto es un bioaceite modificador diseñado para optimizar las propiedades del ligante asfáltico. Su aplicación mejora el desempeño a bajas temperaturas, incrementa la durabilidad a largo plazo y reduce la susceptibilidad al agrietamiento y la resistencia a la fatiga (Sripath Technologies, 2021).

Tabla 4. Especificaciones técnicas y propiedades físicas del NuMIXER.

Propiedad	Valor Típico
Humedad (Horno de Vacío)	2%
Densidad	0.9 kg/litro (7.8 lb/gal)
Viscosidad a 24 °C (75 °F)	0.05 Pa·s (50 cP)
Índice de Yodo	115
Punto de Inflamación (Copa Abierta de Cleveland - COC)	> 280 °C (> 536 °F)
Azufre	< 50 ppm
Insolubles	1.50%

Nota. Tomado de Sripath Technologies, 2022.

2.2.3 Polímero

Los polímeros son materiales que se incorporan al asfalto para mejorar sus propiedades mecánicas. En el presente trabajo se utilizó un producto llamado PGXpand desarrollado por Sripath Technologies. Su incorporación incrementa la resistencia a las deformaciones permanentes, mejora la adherencia entre el asfalto y los agregados, y aumenta la durabilidad de las mezclas asfálticas (Sripath Technologies, 2021).

Tabla 5. Especificaciones técnicas y propiedades físicas del PGXpand.

Propiedad	Valor típico
Punto de ablandamiento	135 a 145 °C (275 a 293 °F)
Pérdida por calentamiento	≤ 0.5 %
Valor ácido	1 a 4 mg KOH/g
Valor de amina	0.2 a 4 mg KOH/g

Nota. Tomado de Sripath Technologies, 2022.

2.3 Agregados minerales

2.3.1 Características de los agregados en mezclas asfálticas

Los agregados minerales son “fragmentos limpios, resistentes y duros, libres de materia vegetal y de exceso de partículas planas, alargadas, blandas o desintegrables” (MTOP, 2021, p. VIII-82) procedentes de la trituración de rocas que deben presentar ciertas características como las siguientes:

- Tamaño.
- Forma.
- Dureza.
- Limpieza.
- Capacidad de adherencia con el asfalto.

2.3.1.1 Tamaño

El tamaño de los agregados minerales utilizados en mezclas asfálticas se clasifica de la siguiente manera:

- Agregado grueso: Todo agregado que se retiene en el tamiz #4 (diámetro mayor a 4,75 mm).
- Agregado fino: Todo agregado que pasan el tamiz #4 y se retienen en el tamiz #200.
- Fillers: Todo agregado pasante del tamiz #200 y que presente un índice de plástico igual a 0.

2.3.1.2 Forma

La forma describe la configuración geométrica superficial y la angularidad de los agregados minerales. Los ensayos para determinar este parámetro son los siguientes:

- Agregados gruesos: Pruebas de “caras fracturadas” y “planas y alargadas”.
- Agregados finos: Pruebas de “angularidad”.

2.3.1.3 Dureza

Se define como la capacidad de los agregados minerales de resistir a la abrasión y la degradación, lo cual determina la vida útil del pavimento una vez instalado. Un agregado con mayor dureza ofrece un mejor rendimiento. Los ensayos para determinar este parámetro son: abrasión de los ángeles y sulfatos para agregados gruesos, y ensayos de sulfatos únicamente para agregados finos.

2.3.1.4 Limpieza

Establece que, para lograr una correcta interacción entre el agregado y el asfalto, el material debe estar libre de polvo y partículas orgánicas. Este parámetro se lo determina mediante ensayos de deletéreos para agregados grueso y finos, y ensayos de deletéreos, equivalente de arena e índice plasticidad para agregados finos.

2.3.1.5 Adherencia

Es una propiedad que depende de factores como la capacidad de absorción y la afinidad química con el asfalto (Mera, 2018)

- Capacidad: Define cuánta cantidad de asfalto se requiere agregar, ya que los agregados muy porosos absorben el ligante asfáltico dejando menos película disponible para unir las partículas. Se prefiere evitar agregados altamente porosos y se evalúa mediante ensayos de resistencia retenida ante el agua (tracción indirecta) y de peladura en agua hirviendo.
- Afinidad con el asfalto: Describe la capacidad del agregado para retener o rechazar moléculas de agua en su superficie, clasificándose en hidrofóbico (si logra retener el asfalto o rechazar el agua adecuadamente) e hidrofílico (si tiene a desprenderse en presencia de humedad).

2.3.1.6 Exigencias de calidad de los agregados en el Ecuador

La tabla 6 muestra los parámetros de control y las exigencias obligatorias para los agregados minerales en mezclas asfálticas.

Tabla 6. Exigencias para las pruebas de control del agregado mineral

PRUEBAS	Agregados	
	Gruesos	Finos
FORMA	Caras fracturadas (>80% -2) Planas y alargadas (<10%)	Angularidad (>45%)
DUREZA	Abrasión los ángeles (>40%) Sulfatos (<12%)	Sulfatos (<12%)
LIMPIEZA	Deletéreos (<1%)	Deletéreos (<1%) Equivalente de arena (>50%) Índice de plasticidad (<4%)
ADHERENCIA	Resistencia retenida ante el agua en prueba de tracción indirecta (>80%) Peladura de la mezcla en agua hirviendo (>95%)	

Nota. Tomado de Mera & Icaza, 2018

2.3.1.7 Propiedades gravimétricas de los agregados combinados

- Gravedad específica bulk del agregado o peso específico bulk (Gsb): Representa la densidad del agregado considerando tanto el volumen sólido de la roca como los poros internos accesibles al agua.
- Gravedad específica del agregado (Gse): Corresponde a la densidad del agregado excluyendo los poros que son penetrados por el cemento asfáltico.
- Porcentaje del cemento asfáltico absorbido (Pba): Indica la proporción en peso de cemento asfáltico que queda retenida dentro de los poros superficiales del agregado en relación con el peso total de la roca seca.

2.4 Mezclas Asfálticas

Las mezclas asfálticas surgen de la combinación de cemento asfáltico, agregados minerales y en ciertos casos aditivos, donde los todos agregados quedarán recubiertos por una película homogénea de ligante.

2.4.1 Parámetros volumétricos

Todos los parámetros volumétricos presentados a continuación, con excepción de la granulometría, se basan en los lineamientos establecidos por el Asphalt Institute (2014).

2.4.1.1 Granulometría

De acuerdo con las normativas viales para pavimentos asfálticos, la granulometría de las capas de rodadura suele ajustarse a los requerimientos de la designación de establecida en las especificaciones MOP-001.

Tabla 7. Limites granulométricos

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada			
	¾"	½"	3/8"	Nº4
1" (25.4 mm.)	100	--	--	--
¾" (19.0 mm.)	90 - 100	100	--	--
½" (12.7 mm.)	--	90 - 100	100	--
3/8" (9.50 mm.)	56 - 80	--	90 - 100	100
Nº 4 (4.75 mm.)	35 - 65	44 - 74	55 - 85	80 - 100
Nº 8 (2.36 mm.)	23 - 49	28 - 58	32 - 67	65 - 100
Nº 16 (1.18 mm.)	--	--	--	40 - 80
Nº 30 (0.60 mm.)	--	--	--	25 - 65
Nº 50 (0.30 mm.)	5 - 19	5 - 21	7 - 23	7 - 40
Nº 100 (0.15 mm.)	--	--	--	3 - 20
Nº 200 (0.075 mm.)	2 - 8	2 - 10	2 - 10	2 - 10

Tomado de *Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes MOP-001-F 2002* (Tabla 405-5.1), por Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 2002.

2.4.1.2 Gravedad específica de bulk (Gmb)

Es la gravedad específica bruta de la mezcla considerando el volumen total, es decir es la relación de la masa seca de una mezcla compactada (considerando los vacíos de aire) y la masa de un volumen de agua.

$$G_{mb} = \frac{W_a}{W_{ss} - W_w}$$

Definición de variables:

Gmb = gravedad específica de bulk.

Wa = masa de muestra seca en aire (gr)

Wss = masa de muestra superficialmente seca (gr)

Ww = masa de muestra en agua (gr)

2.4.1.3 Gravedad específica máxima teórica (Gmm)

También se lo conoce como “RICE”, a diferencia del Gmb el RICE consiste en la relación entre la masa de la mezcla asfáltica suelta (sin considerar los vacíos de aire) y la masa de un volumen de agua.

$$RICE = \frac{A}{A + B - C}$$

Definición de variables:

RICE = gravedad específica máxima teórica

A = masa de muestra seca en aire (gr)

B = masa de recipiente lleno con agua a 25°C

C = masa de recipiente lleno con agua a 25°C con la muestra

2.4.1.4 Vacíos de aire (Va)

Es el porcentaje de volumen de aire que se encuentra entre las partículas de los agregados recubiertos con ligante, su fórmula es la siguiente:

$$Va = \frac{RICE - Gmb}{RICE} * 100$$

Definición de variables:

Va = Vacíos de aire

RICE = gravedad específica máxima teórica (Gmm)

Gmb = gravedad específica de bulk

2.4.1.5 Vacíos en el agregado (VMA)

Es el volumen de los espacios vacíos que se encuentran entre las partículas de los agregados en la mezcla compactada, es decir considera la suma del volumen de ligante efectivo y el volumen de aire, se puede obtener con la siguiente formula:

$$VMA = Vbe + Va \frac{Vmb}{Gmb} * 100$$

Definición de variables:

VMA = vacíos en el agregado

Vbe = volumen de ligante asfáltico efectivo
Va = volumen de vacíos de aire
Vmb = volumen total de la muestra

2.4.1.6 Vacíos rellenos de asfalto (VFA)

Es el porcentaje del VMA que se encuentra ocupado por el ligante asfáltico efectivo, se obtiene de la siguiente formula:

$$VFA = VMA - Va \div VMA$$

Definición de variables:

VFA = vacíos rellenos de asfalto
VMA = vacíos en el agregado
Va = vacíos de aire

2.4.2 Parámetros de resistencia

Todos los conceptos presentes sobre parámetros de resistencia descritos en esta sección se fundamentan en lo establecido por el Asphalt Institute (2007).

2.4.2.1 Estabilidad Marshall

La estabilidad Marshall es la carga máxima de rotura que puede soportar una briqueta a una temperatura específica. Para el ensayo se deberá cumplir con los siguientes requisitos:

➤ Propiedades de briquetas:

- Masa de briquetas = 1200 gramos
- Espesor de briquetas = 2.5 pulgadas
- Diámetro de briquetas = 4 pulgadas

➤ Condiciones del ensayo:

- Velocidad de carga = 2 pulgadas / minuto
- Temperatura = 60 ± 1 °C

2.4.2.2 Flujo Marshall

Es la deformación o variación del diámetro que sufre una briqueta cuando se le es aplicada una carga perpendicular a su eje desde su inicio a la falla (medidas en 0.01

pulg). Este ensayo permite conocer la capacidad de deformación de la mezcla sin llegar a la falla.

2.4.3 Pruebas de desempeño con el Nottingham Asphalt Tester (NAT)

Mediante el uso del equipo NAT modelo NU-10, ubicado en el Laboratorio de Carreteras de la Facultad de Ingeniería en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, se realizó una serie de ensayos dinámicos que permitieron obtener los resultados de Módulo de rigidez, fatiga y deformación permanente.

2.4.3.1 Módulo de rigidez

Los ensayos de Módulo de rigidez se realizan mediante tracción indirecta, aplicando una carga a lo largo del espesor de las briquetas de modo que se pueda realizar una medición de las deformaciones y los esfuerzos producidos por dicha carga. Este ensayo debe ser evaluado de las siguientes modalidades:

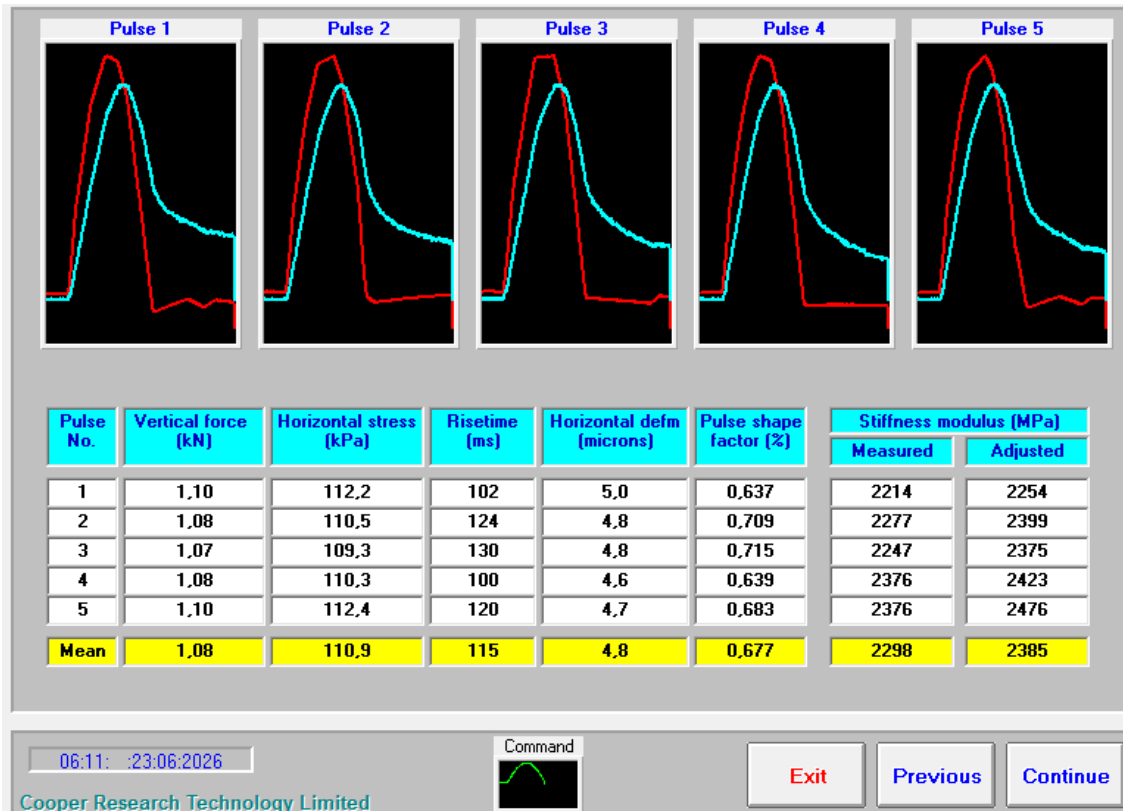
- **Módulo de rigidez bajo deformación controlada (MDC)**

Para realizar el ensayo se debe acondicionar las briquetas a una temperatura de 20°C. Posteriormente se debe aplicar una carga dinámica con pulso medio sinusoidal con un intervalo de 0.12 segundos entre el inicio de carga hasta su máximo valor.

Para el procedimiento se debe tener control de un nivel de deformación de 5 micrones aplicando 5 pulsaciones de carga consecutivas, donde sus valores serán ajustados y promediados (Icaza & Mera, 2018)..

El registro de datos se puede apreciar de la siguiente manera:

Figura 10. Registro de datos para módulo de rigidez bajo deformación controlada en el equipo NAT NU-10



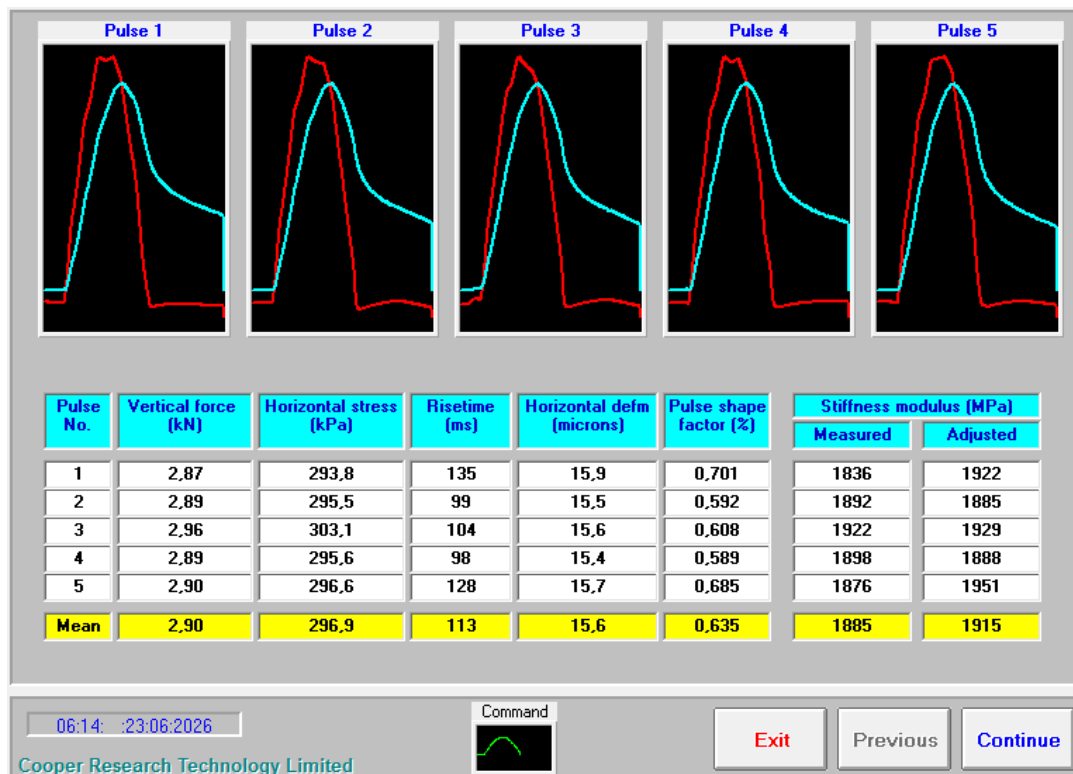
- **Módulo de rigidez bajo esfuerzo controlado (MEC)**

El procedimiento del ensayo es similar al del Módulo de rigidez bajo deformación controlada, su diferencia radica en que la carga aplicada debe ser ajustada a criterio del operador (Icaza & Mera, 2018).

Adicionalmente los resultados de este ensayo son fundamentales para el ensayo de fatiga. Se utiliza el Módulo de rigidez de este ensayo (MEC) para el trazado de la curva de fatiga; por otro lado, la carga ajustada por el operador deberá ser la misma para ambos ensayos.

El registro de datos se presenta de la siguiente forma:

Figura 11. Registro de datos para módulo de rigidez bajo esfuerzo controlado en el equipo NAT NU-10



2.4.3.2 Fatiga

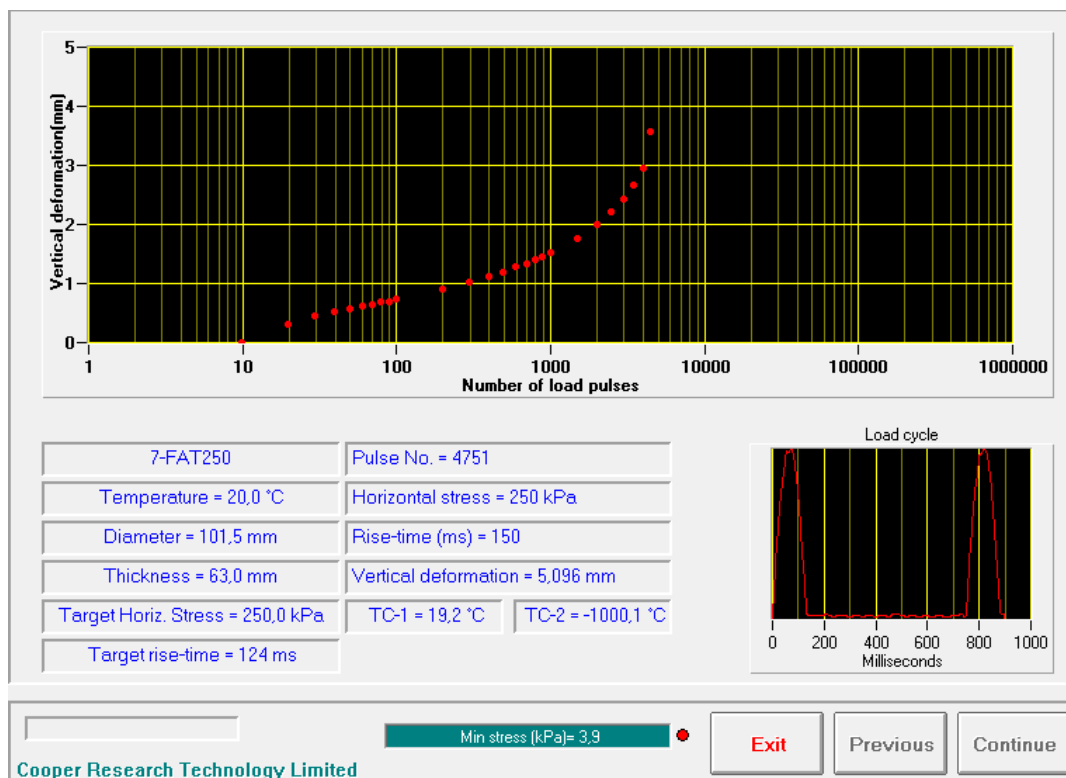
Este ensayo se realiza bajo tracción indirecta, aplicando una serie de esfuerzos controlados en el rango de 100 a 500 kPa, estos deberán ser iguales al esfuerzo aplicado en el Módulo de rigidez bajo esfuerzo controlado. Al igual que en los ensayos de Módulo de rigidez, se realizan pulsaciones en un intervalo de 0.12 segundos y las briquetas deben estar acondicionadas a 20 °C. El ensayo finaliza cuando se determina el número de pulsaciones requeridas para que la muestra alcance una deformación vertical máxima de 5 milímetros o llegue a la falla (Icaza & Mera, 2018). De acuerdo con los criterios del Laboratorio de Carreteras de la UCSG mencionados por Vila (2017), el comportamiento frente a la fatiga se clasifica a partir de la inspección visual de las gráficas obtenidas en pruebas de desempeño con equipo NAT. Dependiendo de dónde se ubique la curva de fatiga de la mezcla analizada, el desempeño se lo define como:

- Satisfactorio: La curva de fatiga se encuentra por encima de la línea de comportamiento promedio.

- Tolerable: La curva de fatiga se mantiene dentro del rango delimitado por la línea promedio y la línea percentil 15.
- Inadecuado: La curva de fatiga se encuentra por debajo de la línea percentil 15.

El software proporciona una gráfica logarítmica relacionando la deformación vertical y las pulsaciones como se observa en la figura 12.

Figura 12. Registro de datos para fatiga en el equipo NAT NU-10

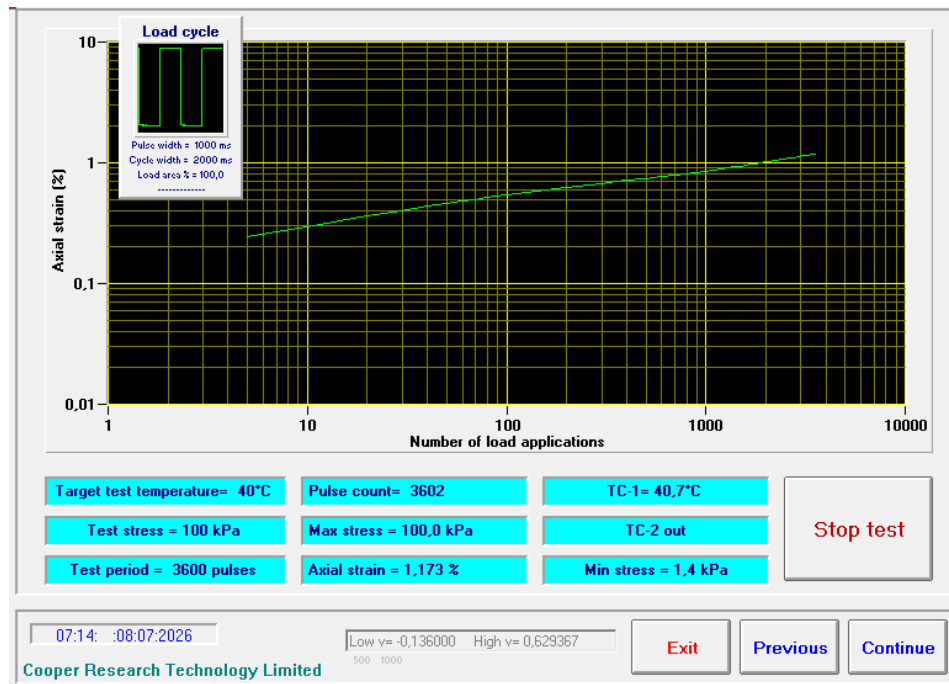


2.4.3.3 Deformación permanente bajo compresión cíclica uniaxial (Creep)

Este ensayo permite conocer la resistencia a la deformación permanente de una briqueta cuando esta es sometida a cargas cíclicas. Durante el ensayo se mide la variación del espesor de la probeta cilíndrica a una temperatura de 40 °C. Se aplica un ciclo de carga de 100 kPa por segundo adicionalmente un tiempo de descanso de 1 segundo y finaliza después de haber alcanzado 3600 repeticiones.

El manual técnico (MOP, 2002), establece que las mezclas asfálticas que presenten deformaciones menores al 1% tendrán un comportamiento satisfactorio ante las deformaciones plásticas (Icaza & Mera, 2018).

Figura 13. Registro de datos para creep en el equipo NAT NU-10



CAPÍTULO III

3 Estudio experimental

3.1 Metodología de trabajo

Se realizarán pruebas de laboratorio para determinar el porcentaje óptimo de cada aditivo. Dicho porcentaje óptimo permite el uso de cada producto en una mezcla de asfalto típica.

3.1.1 Determinación de la dosificación óptima

En el presente trabajo de investigación se utilizaron tres tipos de aditivos: un rejuvenecedor (Relixer), un ablandador (Numixer) y un polímero (PGXpand), los cuales se mezclaron con el cemento asfáltico.

El porcentaje óptimo (2.3%) del Relixer y Numixer se determinó mediante ensayos de viscosidad. En función de los resultados obtenidos para los porcentajes de 1%, 2% y 3%, se escogió el porcentaje óptimo que cumpliera con los requerimientos mínimos establecidos por normativa. Específicamente, para clasificar un asfalto como AC-20, la normativa menciona que debe presentar una viscosidad absoluta entre 160 Pa*s-240 Pa*s, y una ductilidad de mínima de 50 cm (INEN, 2014).

El porcentaje óptimo de PGXpand se estableció en 1% de acuerdo con las recomendaciones de estudios previos.

Tabla 8. Resultados de viscosidad y ductilidad entre ligante asfáltico convencional y aditivado

ENSAYO (ASTM)	Convencional	NuMixer			ReLixer			PGXPand	
		1%	2%	3%	1%	2%	3%	1%	2%
RESULTADOS									
LIGANTE ORIGINAL									
Viscosidad absoluta, 60 °C (Pa.s)	283	175	132	116	159	133	128		
Viscosidad absoluta, 90 °C (Pa.s)								167	1020
Viscosidad absoluta, 110 °C (Pa.s)								1,44	5,72
Viscosidad absoluta, 135 °C (Pa.s)								0,34	0,29
RESIDUO RTFOT, 163°C, 85 min (ASTM D 2872)									
Ductilidad 25°C, 5 cm/min (cm)	31,50	38,50	47,00	63,50	36,50	50,50	59,50	26,25	9,50
Viscosidad absoluta, 60 °C (Pa.s)	1440	1210	985	693	1150	823	672	-	-
Viscosidad absoluta, 100 °C (Pa.s)								8,58	572
Viscosidad absoluta, 120 °C (Pa.s)								1,76	1,44
Viscosidad absoluta, 135 °C (Pa.s)								0,70	0,58

Tabla 9. Resultados de ensayos realizados al asfalto modificado con cada uno de los aditivos con su porcentaje óptimo

ENSAYOS	ADITIVO	NuMixer	ReLixer	PGXPand
	%	2,3%	2,3%	1%
	UNIDAD	RESULTADOS		
LIGANTE ORIGINAL				
Penetración, 25 °C, 100 g, 5 s	0,1 mm	102	105	59
Penetración, 4 °C, 200 g, 60 s	0,1 mm	-	-	52
Viscosidad absoluta, 60 °C	Pa.s	132	129	-
Viscosidad absoluta, 90 °C	Pa.s	-	-	167
Viscosidad absoluta, 110 °C	Pa.s	-	-	1,442
Viscosidad absoluta, 135 °C	Pa.s	0,293	0,315	0,34
Viscosidad cinemática, 135 °C	mm²/s	311	335	360
Gravedad específica 25°C/25°C		1,008	1,008	1,012
Punto de inflamación Cleveland	°C	310	270	298
Punto de ablandamiento	°C	48,5	47	-
Índice de penetración		0,33	-0,02	-
Recuperación elástica por torsión, 25 °C	%	-	-	5,56
RESIDUO RTFOT, 163°C, 85 min (ASTM D 2872)				
Ductilidad 25°C, 5 cm/min	cm	52,40	51,50	26,25
Recuperación elástica, 25°C, 10 cm elongación	%	-	-	30
Penetración, 4 °C, 200 g, 60 s	0,1 mm	-	-	35
Viscosidad absoluta, 60 °C	Pa.s	0,862	0,793	-
Viscosidad absoluta, 100 °C	Pa.s	-	-	8,58
Viscosidad absoluta, 120 °C	Pa.s	-	-	1,76
Viscosidad absoluta, 135 °C	Pa.s	-	-	0,70

3.1.2 Proceso de mezclado

A continuación, se describen los pasos del proceso de mezclado para cada porcentaje de aditivo en el cemento asfáltico.

1. Se calculó la cantidad a utilizar mediante el porcentaje óptimo de cada producto correspondiente.
2. Se calentó el cemento asfáltico a una temperatura de 140°C-150°C.
3. Se incorporó la cantidad determinada de producto en el cemento asfáltico.
4. Se mezcló constantemente a una temperatura controlada de 145-155 °C durante 30 minutos para los productos ReLIXER y NuMIXER. Para el producto PGXpand, el mezclado se realizó durante 40 minutos, a una temperatura controlada de 155–165 °C.

Se utilizó la mezcla final de cada producto para la elaboración de las briquetas conforme al diseño de mezcla correspondiente.

3.1.3 Características de los agregados usados en el diseño de mezcla

- **Tamaño y Propiedades Físicas Generales**

Origen de los materiales: Cantos rodados triturados y arena de río

Peso específico de los agregados (G_{sb}): 2,709

Gravedad específica efectiva del agregado (G_{se}): 2,766

- **Forma**

Partículas planas y alargadas (Agregados gruesos): 2,1%

- **Dureza**

Abrasión de Los Ángeles: 17,5%

Ensayo de sulfato de sodio (Agregados gruesos): 0,8%

Ensayo de sulfato de sodio (Agregados finos): 1,0%

- **Limpieza**

Equivalente de arena: 69,5%

- **Adherencia**

Porcentaje de absorción en agua: 1,28%

C.A. absorbido por el agregado (P_{ba}): 0,77%

3.1.4 Proceso de Envejecimiento de las briquetas

1. Precalentar el horno de convección a 85 °C.
2. Colocar las briquetas sobre bandejas perforadas separadas a 5 cm entre sí y de las paredes.
3. Dejar las muestras a 85 °C durante 5 días (120 horas).
4. Apagar el horno y no manipular las briquetas hasta que se enfríen.

3.2 Distribución de briquetas

Se trabajó con un total de 60 briquetas, donde se utilizaron 15 briquetas para cada caso de estudio (referencia, rejuvenecedor, suavizante y polímero), la distribución fue la siguiente:

Figura 14. Distribución de las briquetas utilizadas



CAPÍTULO IV

4 Resultados y análisis de resultados

4.1 Resultados del método Marshall

- Dosificación de mezcla

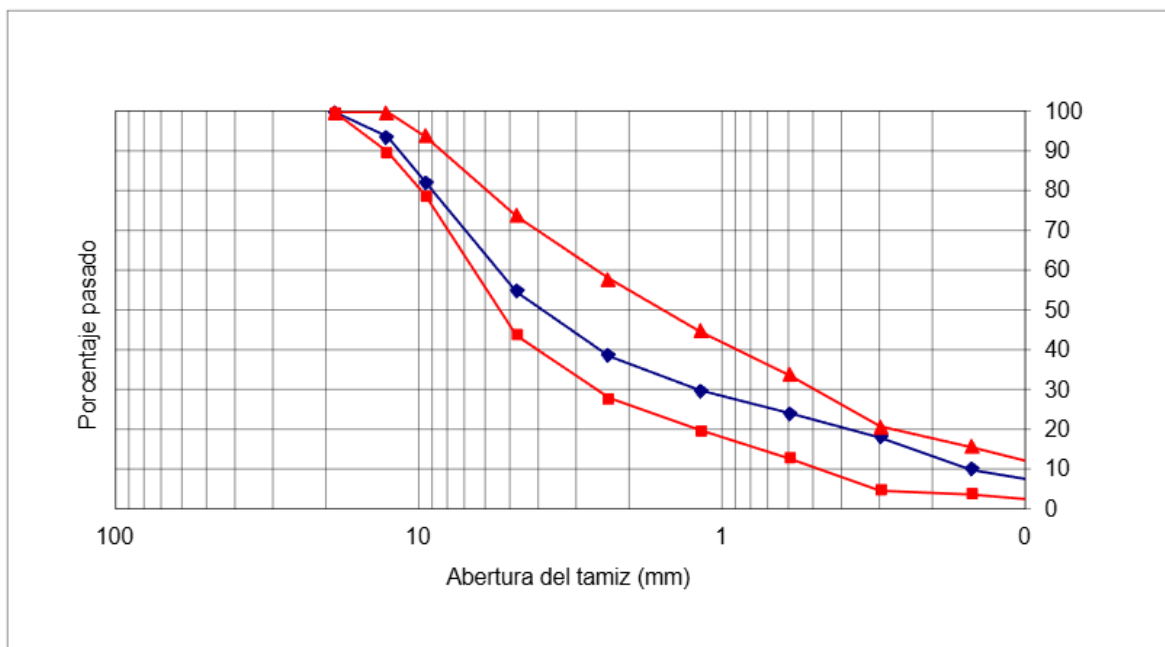
Se utilizó la siguiente granulometría para la elaboración de briquetas:

Tabla 10. Porcentajes de dosificación de los materiales pétreos

	TIPO :	CANTERA:	DOSIF:
AGREGADO 1 :	Grava 3/4"	Sozoranga	25
AGREGADO 2 :	Grava 3/8"	Sozoranga	65
AGREGADO 3	ARENA	Río Payo	10
			100

Con la dosificación de la tabla 8 se obtuvo una curva granulométrica que cumple con los límites establecidos por normativa vigente

Figura 15. Curva granulométrica de diseño para la mezcla asfáltica

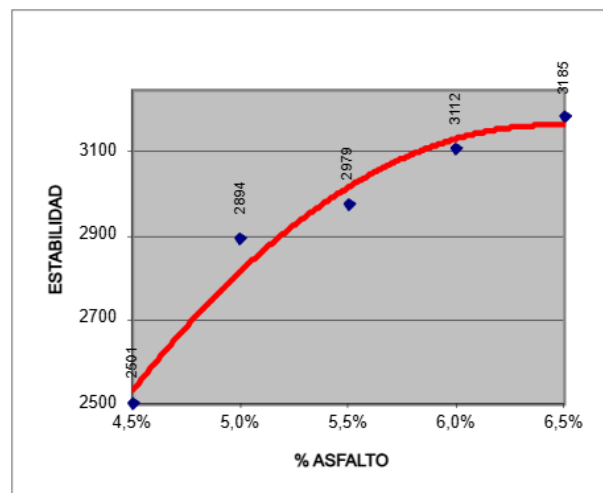


Se presenta a continuación los resultados promedios obtenidos en el método Marshall y los gráficos de diseño:

Tabla 11. Resumen de los resultados Marshall

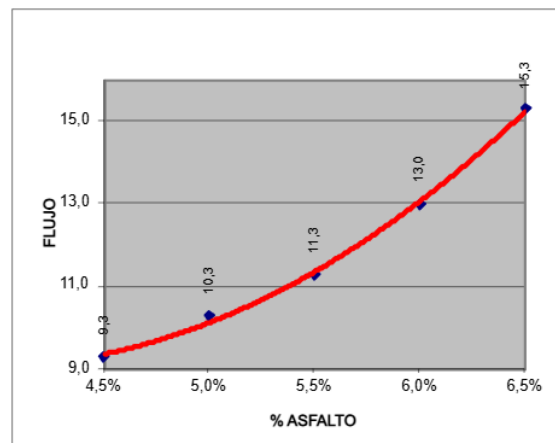
% ASFALTO	ESTABILIDAD (lbs)	FLUJO (0.01")	PESO UNITARIO (Kg/m ³)	% VACÍOS EN AGREGADO	% VACIOS MEZCLA	% VACIOS RELLENOS
4,5%	2501	9,3	2358	16,9	8,0	52,5
5,0%	2894	10,3	2381	16,5	6,4	61,4
5,5%	2979	11,3	2416	15,7	4,2	73,1
6,0%	3112	13,0	2446	15,1	2,3	84,9
6,5%	3185	15,3	2420	16,5	2,6	84,3

Figura 16. Estabilidad máxima - Diseño Marshall



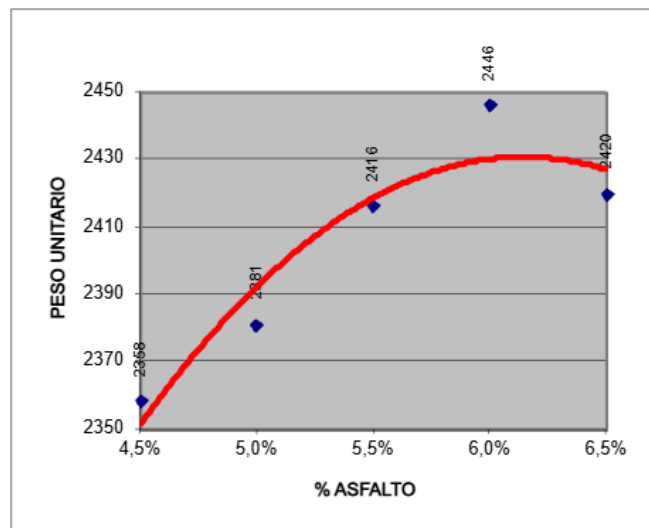
Maxima estabilidad = 3040 lbs
% Asfalto = 5,55%

Figura 17. Flujo máximo - Diseño Marshall



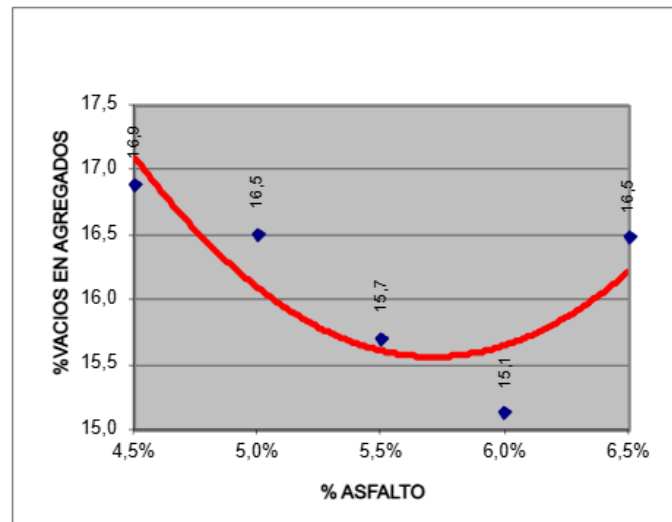
Flujo = 11.50 pulg/100
% Asfalto = 5,55%

Figura 18. Densidad máxima - Diseño Marshall



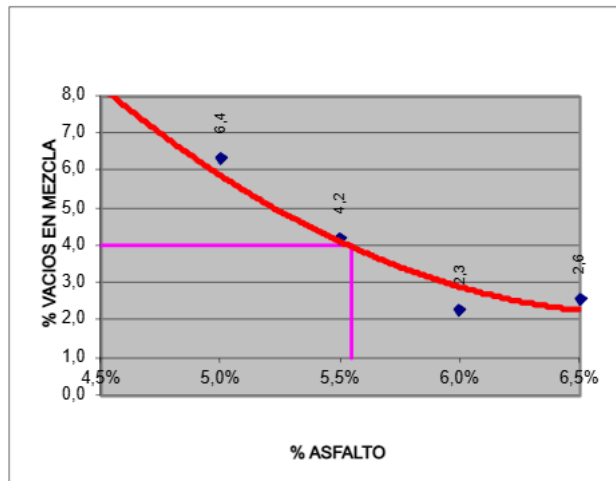
Peso Unitario = 2422 kg/m³
% Asfalto = 5,55%

Figura 19. Vacíos en el agregado mineral - Diseño Marshall



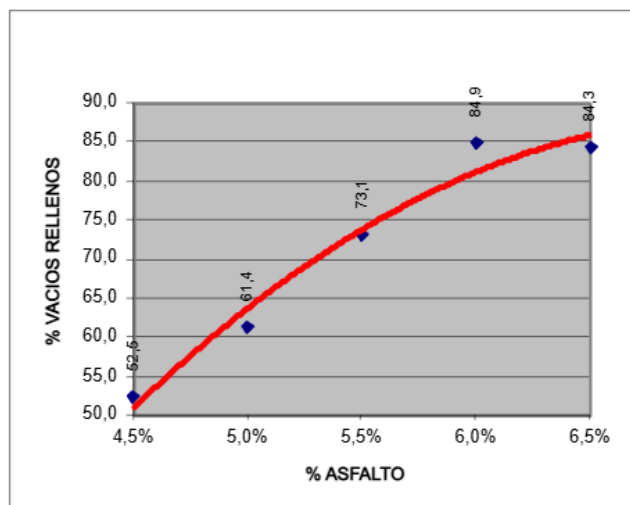
V.M.A = 15,60%
% Asfalto = 5,55%

Figura 20. Vacíos de aire - Diseño Marshall



Valor medio de vacíos = 4%
 % Asfalto = 5,55%

Figura 21. Vacíos rellenos de asfalto - Diseño Marshall



V.F.A = 74,50%
 % Asfalto = 5,55%

4.2 Parámetros volumétricos de briquetas

Las briquetas evaluadas en este estudio presentan los siguientes parámetros volumétricos:

Tabla 12. Parámetros volumétricos del asfalto de referencia

MEZCLA CON ASFALTO DE REFERENCIA							
N	H (cm)	P. Seco (g)	P. Agua (g)	P. SSS (g)	Gmb	Gmm	%Vacios
1	6,10	1221	721	1223	2432	2520	3.49
2	6,40	1258	738	1260	2415	2520	4.17
3	6,00	1167	684	1168	2411	2520	4.33
4	6,30	1255	740	1257	2427	2520	3.68
5	5,90	1172	673	1173	2442	2520	3.10
6	6,00	1191	699	1193	2411,000	2520	4.33
7	6,30	1251	737	1253	2424	2520	3.81
8	6,50	1270	757	1272	2416	2520	4.17
9	6,50	1293	766	1295	2444	2520	3.02
10	6,50	1277	757	1279	2422	2520	3.89
11	6,00	1183	694	1184	2414	2520	4.21
12	6,40	1260	745	1261	2442	2520	3.10
13	6,30	1210	733	1211	2441	2520	3.13
14	5,80	1155	677	1156	2411	2520	4.33
15	6,50	1300	764	1301	2421	2520	3.92

Tabla 13. Parámetros volumétricos del asfalto aditivado con ReLIXER

MEZCLA ASFÁLTICA CON RELIXER 2,3%						
N	H (cm)	P. Seco (g)	P. Agua (g)	P. SSS (g)	Gmb	%Vacios
ORIGINAL (ACP)						
1	6,1	1237	731	1239	2,435	4,28
2	6,3	1243	734	1245	2,432	4,4
3	6,3	1258	744	1260	2,438	4,17
4	6,2	1236	734	1237	2,457	3,42
5	6,6	1318	780	1320	2,441	4,05
6	6,2	1216	718	1217	2,437	4,21
7	6,3	1257	743	1258	2,441	4,05
8	6,4	1281	758	1282	2,445	3,89
9	6,1	1222	725	1223	2,454	3,54
10	6	1186	701	1187	2,44	4,09
11	6,0	1187	703	1188	2,447	3,81
12	6,3	1274	753	1275	2,441	4,05
13	6,3	1283	758	1284	2,442	4,13
14	6,1	1221	722	1222	2,442	4,01
15	6,1	1214	717	1215	2,438	4,17

Tabla 14. Parámetros volumétricos del asfalto aditivado con NuMIXER

MEZCLA ASFÁLTICA CON NUMIXER 2,3%						
N	H (cm)	P. Seco (g)	P. Agua (g)	P. SSS (g)	Gmb	%Vacíos
1	6,20	1235	728	1237	2,426	4,22
2	6,30	1243	732	1245	2,423	4,34
3	6,10	1219	720	1221	2,433	3,95
4	6,40	1263	747	1265	2,438	3,75
5	6,40	1266	747	1268	2,43	4,09
6	6,00	1169	687	1170	2,420	4,46
7	62,00	1236	734	1237	2,457	3,42
8	61,00	1222	725	1223	2,454	3,54
9	6,30	1256	738	1257	2,42	4,46
10	60,00	1187	703	1188	2,447	3,81
11	6,40	1226	754	1278	2,435	3,87
12	6,20	1234	726	1235	2,424	4,30
13	6,10	1229	725	1230	2,434	3,91
14	6,40	1260	740	1261	2,418	4,54
15	6,30	1252	735	1253	2,417	4,58

Tabla 15. Parámetros volumétricos del asfalto aditivado con PGXpand

MEZCLA ASFÁLTICA CON PGXPAND 1%							
N	H (cm)	P. Seco (g)	P. Agua (g)	P. SSS (g)	Gmb	Gmm	%Vacíos
1	6,40	1201	741	1261	2411	2512,00	4.02
2	6,20	1227	717	1228	2401	2512	4.42
3	6,40	1268	737	1264	2406	2512	4.22
4	6,40	1248	720	1249	2405	2512	4.26
5	6,30	1235	724	1237	2407	2512	4.18
6	6,20	1205	706	1207	2405,000	2512,000	4.26
7	5,90	1174	688	1175	2411	2512	4.02
8	6,50	1267	743	1270	2404	2512	4.30
9	6,30	1235	724	1237	2407	2512	4.18
10	6,40	1262	743	1264	2422	2512	3.58
11	6,30	1244	728	1245	2406	2512	4.22
12	6,20	1214	715	1215	2428,000	2512,000	3.34
13	6,50	1284	754	1285	2418	2512	3.74
14	6,40	1271	743	1272	2403	2512	4.34
15	6,50	1289	758	1289	2427	2512	3.38

4.3 Resultados del ensayo del Módulo de rigidez

- Referencia

Se determinaron los módulos de rigidez de las briquetas de referencia sin envejecer (envejecimiento a corto plazo) a una temperatura de 20°C.

En la tabla 14 se observa los módulos de rigidez y los valores de desviación estándar, coeficiente de variación y el promedio de las tres muestras representativas.

Tabla 16. Módulo de rigidez de las muestras de referencia (Original - ACP)

Muestra \ Tipo de Mezcla	Referencia (Mpa)
1	2701
2	2747
3	2860
Promedio	2769
Des. Estándar	82
Coef. Variación	3,0

Se determinaron los módulos de rigidez de las briquetas con PGXpand al 1% sin envejecer (envejecimiento a largo plazo) a una temperatura de 20°C.

En la tabla 15 se observa los módulos de rigidez y los valores de desviación estándar, coeficiente de variación y el promedio de las tres muestras representativas.

Tabla 17. Módulo de rigidez de las muestras de referencia (Envejecido - ALP)

Muestra \ Tipo de Mezcla	Referencia (Mpa)
4	4083
5	4087
6	4170
Promedio	4113
Des. Estándar	49
Coef. Variación	1,2

- ReLIXER

Se determinaron los módulos de rigidez de las briquetas con ReLIXER al 2.3% sin envejecer (envejecimiento a corto plazo) a una temperatura de 20°C.

En la tabla 16 se observa los módulos de rigidez y los valores de desviación estándar, coeficiente de variación y el promedio de las tres muestras representativas.

Tabla 18. Módulo de rigidez de las muestras con ReLIXER (Original – ACP)

Tipo de Mezcla Muestra	ReLIXER 2.3% (MPa)
1	2079
2	2189
3	2220
Promedio	2163
Des. Estándar	74
Coef. Variación	3,4

Se determinaron los módulos de rigidez de las briquetas con ReLIXER al 2.3% sin envejecer (envejecimiento a largo plazo) a una temperatura de 20°C.

En la tabla 17 se observa los módulos de rigidez y los valores de desviación estándar, coeficiente de variación y el promedio de las tres muestras representativas.

Tabla 19. Módulo de rigidez de las muestras con ReLIXER (Envejecido - ALP)

Tipo de Mezcla Muestra	ReLIXER 2.3% (MPa)
4	2993
5	3119
6	3334
Promedio	3149
Des. Estándar	172
Coef. Variación	5,5

- NuMIXER

Se determinaron los módulos de rigidez de las briquetas con NuMIXER al 2.3% sin envejecer (envejecimiento a corto plazo) a una temperatura de 20°C.

En la tabla 18 se observa los módulos de rigidez y los valores de desviación estándar, coeficiente de variación y el promedio de las tres muestras representativas.

Tabla 20. Módulo de rigidez de las muestras con NuMIXER (Original - ACP)

Muestra \ Tipo de Mezcla	NuMIXER 2.3% (MPa)
1	1946
2	1974
3	2061
Promedio	1994
Des. Estándar	60
Coef. Variación	3,0

Se determinaron los módulos de rigidez de las briquetas con NuMIXER al 2.3% sin envejecer (envejecimiento a largo plazo) a una temperatura de 20°C.

En la tabla 19 se observa los módulos de rigidez y los valores de desviación estándar, coeficiente de variación y el promedio de las tres muestras representativas.

Tabla 21. Módulo de rigidez de las muestras con NuMIXER (Envejecido - ALP)

Muestra \ Tipo de Mezcla	NuMIXER 2.3% (MPa)
4	2977
5	3260
6	3711
Promedio	3316
Des. Estándar	370
Coef. Variación	11,2

- PGXpand

Se determinaron los módulos de rigidez de las briquetas con PGXpand al 1% sin envejecer (envejecimiento a corto plazo) a una temperatura de 20°C.

En la tabla 20 se observa los módulos de rigidez y los valores de desviación estándar, coeficiente de variación y el promedio de las tres muestras representativas.

Tabla 22. Módulo de rigidez de las muestras con PGXpand (Original - ACP)

Muestra \ Tipo de Mezcla	PGXpand 1% (MPa)
1	3023
2	3053
3	3071
Promedio	3049
Des. Estándar	24
Coef. Variación	0,8

Se determinaron los módulos de rigidez de las briquetas con PGXpand al 1% sin envejecer (envejecimiento a largo plazo) a una temperatura de 20°C.

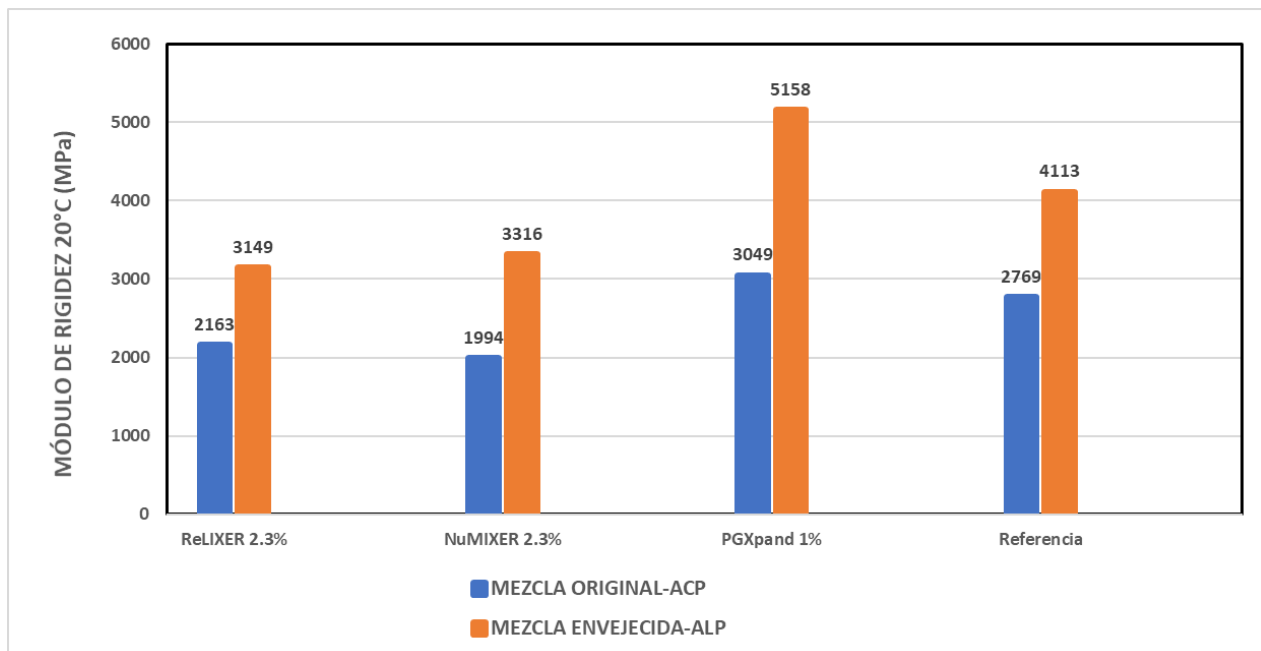
En la tabla 21 se observa los módulos de rigidez y los valores de desviación estándar, coeficiente de variación y el promedio de las tres muestras representativas.

Tabla 23. Módulo de rigidez de las muestras con PGXpand (Envejecido - ALP)

Muestra \ Tipo de Mezcla	PGXpand 1% (MPa)
4	5003
5	5231
6	5240
Promedio	5158
Des. Estándar	134
Coef. Variación	2,6

4.3.1 Resumen de resultados

Figura 22. Comparación del módulo de rigidez a 20 °C en mezclas asfálticas original (envejecimiento a corto plazo) y envejecidas (envejecimiento a largo plazo) con diferentes aditivos



4.4 Resultados de fatiga

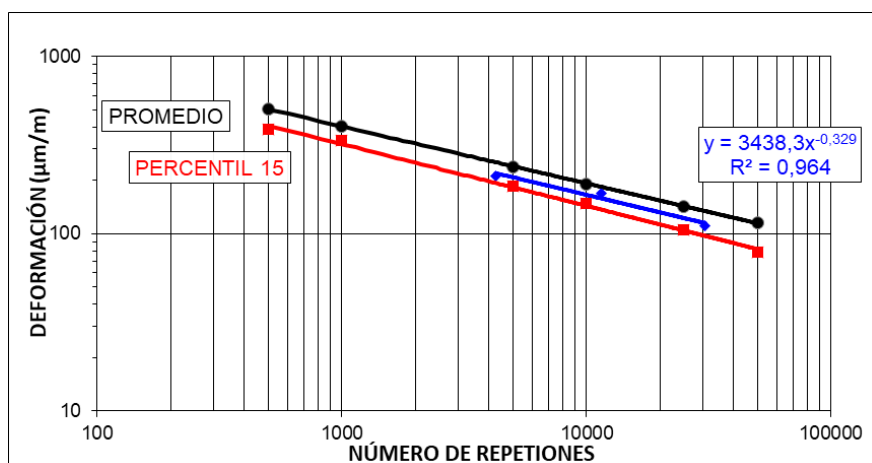
Se realizaron los ensayos a fatiga de las briquetas de referencia y aditivadas. Debido a limitaciones del laboratorio y de tiempo, se realizaron los ensayos con las briquetas envejecidas.

- Referencia

Tabla 24. Resultados del ensayo a fatiga de las muestras de referencia

ESFUERZO (KPa)	REPETICIONES	DEFORMACIÓN (μm/m)	MÓDULO RIGIDEZ (MPa)
250	30521	111	4631
300	11491	170	3628
350	4251	212	3385

Figura 23. Gráfico de los ensayos a fatiga de las briquetas de referencia

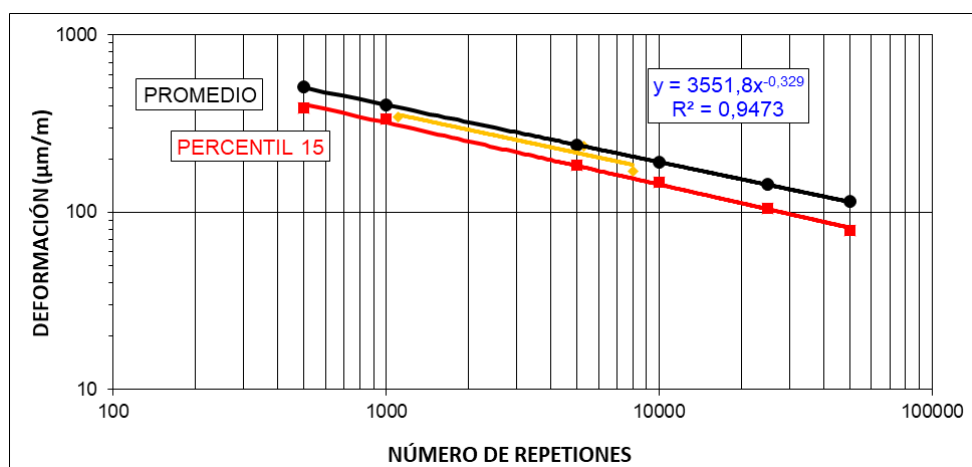


- ReLIXER

Tabla 25. Resultados del ensayo a fatiga de las muestras con ReLIXER

ESFUERZO (KPa)	REPETICIONES	DEFORMACIÓN (μm/m)	MÓDULO RIGIDEZ (MPa)
250	8011	170	3012
300	5311	236	2603
350	1111	347	2069

Figura 24. Gráfico de los ensayos a fatiga de las briquetas con ReLIXER

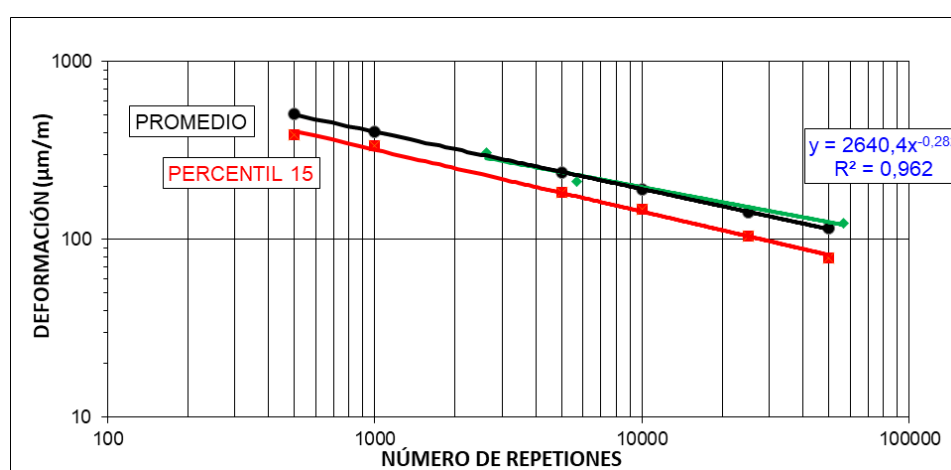


- NuMIXER

Tabla 26. Resultados del ensayo a fatiga de las muestras con NuMIXER

ESFUERZO (KPa)	REPETICIONES	DEFORMACIÓN (μm/m)	MÓDULO RIGIDEZ (MPa)
200	56751	123	3324
300	5701	212	2895
350	2611	306	2345

Figura 25. Gráfico de los ensayos a fatiga de las briquetas con NuMIXER

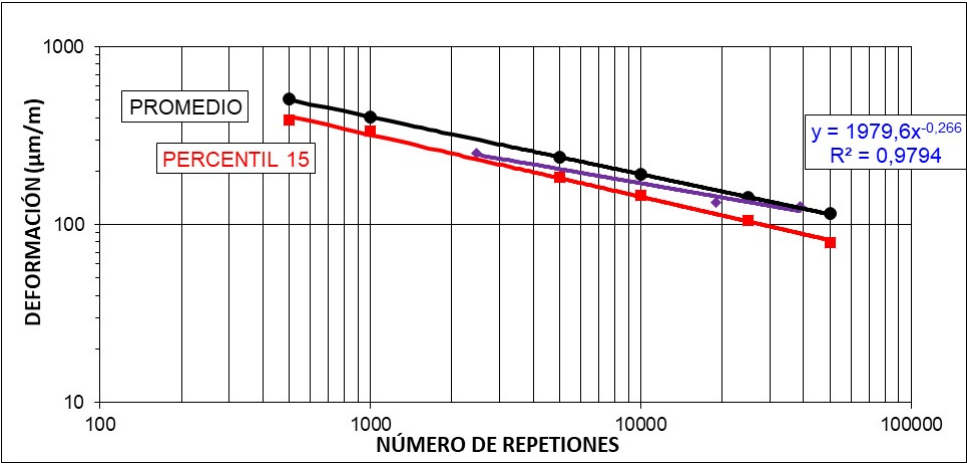


- PGXpand

Tabla 27. Resultados del ensayo a fatiga de las muestras con PGXpand

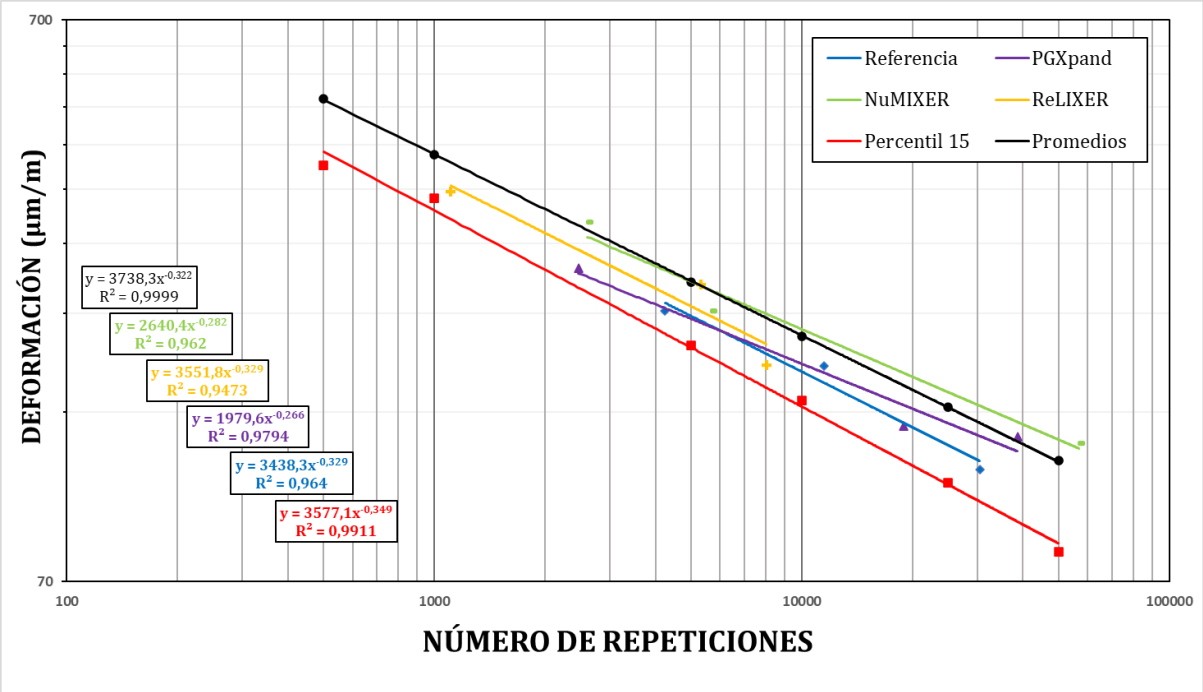
ESFUERZO (KPa)	REPETICIONES	DEFORMACIÓN (μm/m)	MÓDULO RIGIDEZ (MPa)
250	38691	127	4038
300	18951	133	4638
350	2471	253	2832

Figura 26. Gráfico de los ensayos a fatiga de las briquetas con PGXpand



4.4.1 Resumen de resultados

Figura 27. Curvas de fatiga de las briquetas aditivadas y de referencia



4.5 Resultados de creep

- Referencia

Se determinaron los valores de deformación permanente de las briquetas de referencia sin envejecer (envejecimiento a corto plazo) y con envejecido (envejecimiento a largo plazo) a una temperatura de 40°C.

En la tabla 26 y 27 se observa los valores de deformación permanente, desviación estándar, coeficiente de variación y el promedio de las tres muestras representativas.

Tabla 28. Resultados del ensayo Creep de las muestras de referencia (Original – ACP)

Muestra \ Tipo de Mezcla	Referencia (%)
1	1,173
2	1,085
3	1,049
Promedio	1,102
Des. Estándar	0,064
Coef. Variación	5,787

Tabla 29. Resultados del ensayo Creep de las muestras de referencia (Envejecido – ALP)

Muestra \ Tipo de Mezcla	Referencia (%)
4	1,054
5	1,002
6	0,739
Promedio	0,932
Des. Estándar	0,169
Coef. Variación	18,125

- ReLIXER

Se determinaron los valores de deformación permanente de las briquetas con ReLIXER sin envejecer (envejecimiento a corto plazo) y con envejecido (envejecimiento a largo plazo) a una temperatura de 40°C.

En la tabla 28 y 29 se observa los valores de deformación permanente, desviación estándar, coeficiente de variación y el promedio de las tres muestras representativas.

Tabla 30. Resultados del ensayo Creep de las muestras con ReLIXER (Original – ACP)

Muestra \ Tipo de Mezcla	ReLIXER (%)
1	1,011
2	0,907
3	0,898
Promedio	0,939
Des. Estándar	0,063
Coef. Variación	6,691

Tabla 31. Resultados del ensayo Creep de las muestras con ReLIXER (Envejecido – ALP)

Muestra \ Tipo de Mezcla	ReLIXER (%)
4	0,944
5	0,914
6	0,840
Promedio	0,899
Des. Estándar	0,054
Coef. Variación	5,952

- NuMIXER

Se determinaron los valores de deformación permanente de las briquetas con NuMIXER sin envejecer (envejecimiento a corto plazo) y con envejecido (envejecimiento a largo plazo) a una temperatura de 40°C.

En la tabla 30 y 31 se observa los valores de deformación permanente, desviación estándar, coeficiente de variación y el promedio de las tres muestras representativas.

Tabla 32. Resultados del ensayo Creep de las muestras con NuMIXER (Original – ACP)

Muestra \ Tipo de Mezcla	NuMIXER (%)
1	1,055
2	1,007
3	1,572
Promedio	1,211
Des. Estándar	0,313
Coef. Variación	25,861

Nota. Tal como se observa en el Anexo 21 se obtuvo un resultado de 1,572% en el ensayo Creep, reflejando el comportamiento de un suavizante en la aplicación de mezclas asfálticas.

Tabla 33. Resultados del ensayo Creep de las muestras con NuMIXER (Envejecido – ALP)

Muestra \ Tipo de Mezcla	NuMIXER (%)
4	1,155
5	1,076
6	0,873
Promedio	1,035
Des. Estándar	0,145
Coef. Variación	14,060

- PGXpand

Se determinaron los valores de deformación permanente de las briquetas con NuMIXER sin envejecer (envejecimiento a corto plazo) y con envejecido (envejecimiento a largo plazo) a una temperatura de 40°C.

En la tabla 32 y 33 se observa los valores de deformación permanente, desviación estándar, coeficiente de variación y el promedio de las tres muestras representativas.

Tabla 34. Resultados del ensayo Creep de las muestras con PGXpand (Original – ACP)

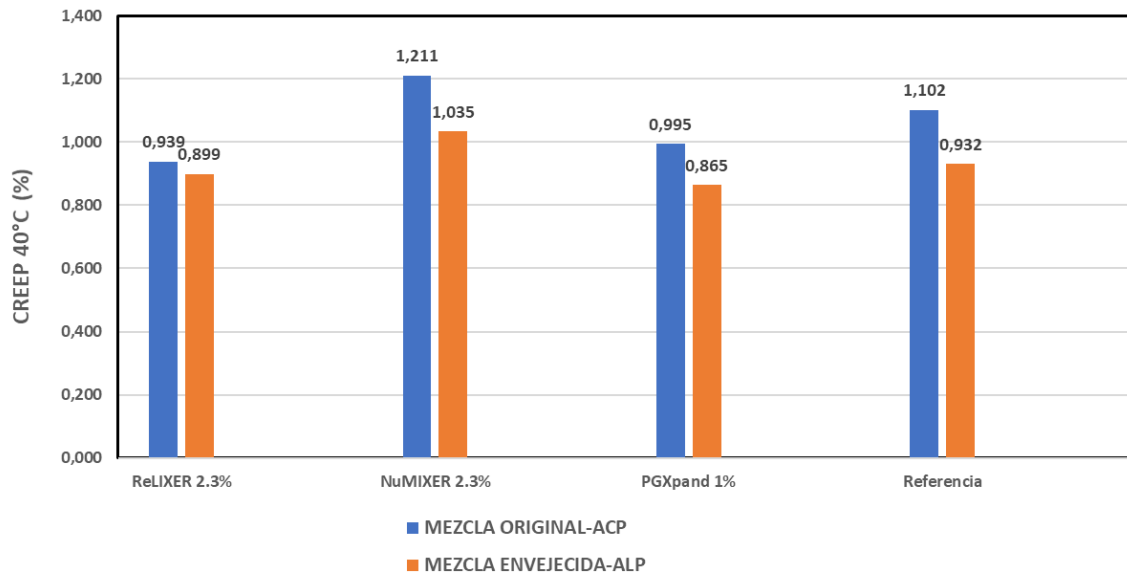
Muestra \ Tipo de Mezcla	PGXpand (%)
1	1,065
2	0,997
3	0,924
Promedio	0,995
Des. Estándar	0,071
Coef. Variación	7,085

Tabla 35. Resultados del ensayo Creep de las muestras con PGXpand (Envejecido – ALP)

Muestra \ Tipo de Mezcla	PGXpand (%)
4	1,058
5	0,833
6	0,704
Promedio	0,865
Des. Estándar	0,179
Coef. Variación	20,712

4.5.1 Resumen de resultados

Figura 28. Gráfico de barras de los resultados de Creep



Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

1.- Se determinó que los porcentajes óptimos de aditivo para las mezclas modificadas serían: 2.3% para el rejuvenecedor (ReLIXER) y 2.3% para el suavizante (NuMIXER). Por otro lado, se estableció un 1% para el polímero (PGXpand). Estos resultados se obtuvieron gracias a una serie de análisis realizados y recomendaciones de trabajos previos.

2.- Se utilizó una mezcla asfáltica de referencia diseñada por el método Marshall con un porcentaje de cemento asfáltico del 5.55%. Esta mezcla base cuenta con una estabilidad de 3040 lbs, un flujo de 11.50 (0.01"), un peso unitario de 2422 kg/m³ y un 4% de vacíos de aire. Estos resultados cumplen con los requerimientos para tráfico pesado establecidos por el Asphalt Institute.

3.- Con el porcentaje óptimo de cada aditivo, se elaboró un total de 60 briquetas correspondientes a los cuatro casos de estudio, donde se preparó muestras con envejecimiento a corto plazo (ACP) y a largo plazo (ALP), para la ejecución de los ensayos mecánicos (módulo de rigidez, fatiga y creep), con 15 muestras destinadas a cada caso de estudio.

4.- Se determinó que los modificadores tipo bioaceite (ReLIXER y NuMIXER) cumplen satisfactoriamente la función de disminuir la rigidez de la mezcla frente a la referencia, tanto en condición de envejecimiento a corto como a largo plazo. En contraste, la incorporación del polímero PGXpand presentó un incremento de la rigidez de la mezcla en ambos estados de envejecimiento, registrando los valores más elevados de todo el estudio.

En las pruebas de Creep a 40 °C, las mezclas asfálticas modificadas con ReLIXER y PGXpand redujeron el porcentaje de deformación permanente frente a la mezcla de referencia, tanto para envejecimiento a corto como en largo plazo. Por otra parte, la mezcla asfáltica modificada con NuMIXER incrementó notablemente la susceptibilidad a la deformación permanente alcanzando los valores más altos del ensayo, este comportamiento ocurre debido a su naturaleza ablandante.

Debido a limitaciones de laboratorio, el ensayo de fatiga se evaluó únicamente en las muestras con envejecimiento a largo plazo. Con los resultados obtenidos, se puede concluir que todas las mezclas modificadas presentaron un mejor comportamiento frente al agrietamiento por fatiga en comparación con la mezcla de referencia. El desempeño más notable lo mostró el suavizante NuMIXER, el cual tuvo el mejor desempeño frente a los agrietamientos por fatiga.

5.- Con los resultados obtenidos se puede concluir que la implementación de cada aditivo dependerá del comportamiento que se desee mejorar en una mezcla asfáltica. Para mezclas en las que se busque reducir la susceptibilidad a las deformaciones permanentes se recomendaría el rejuvenecedor ReLIXER y el polímero PGXpand que presentan un comportamiento más favorable, por otra parte, el uso suavizante NuMIXER podría ser conveniente cuando se requiera una mayor resistencia al agrietamiento por fatiga.

Recomendaciones

- 1.- Se recomienda ampliar el estudio de estos aditivos incorporando en futuras líneas de investigación ensayos adicionales para evaluar otras propiedades en las mezclas modificadas.
- 2.- Se sugiere replicar la metodología evaluando los aditivos con agregados pétreos de diferente origen mineralógico o de distintas canteras locales, para comprobar si el comportamiento mecánico obtenido se mantiene bajo otras propiedades geológicas.
- 3.- Se recomienda realizar un análisis de costo-beneficio para evaluar la viabilidad de implementar estos aditivos internacionales en el país.

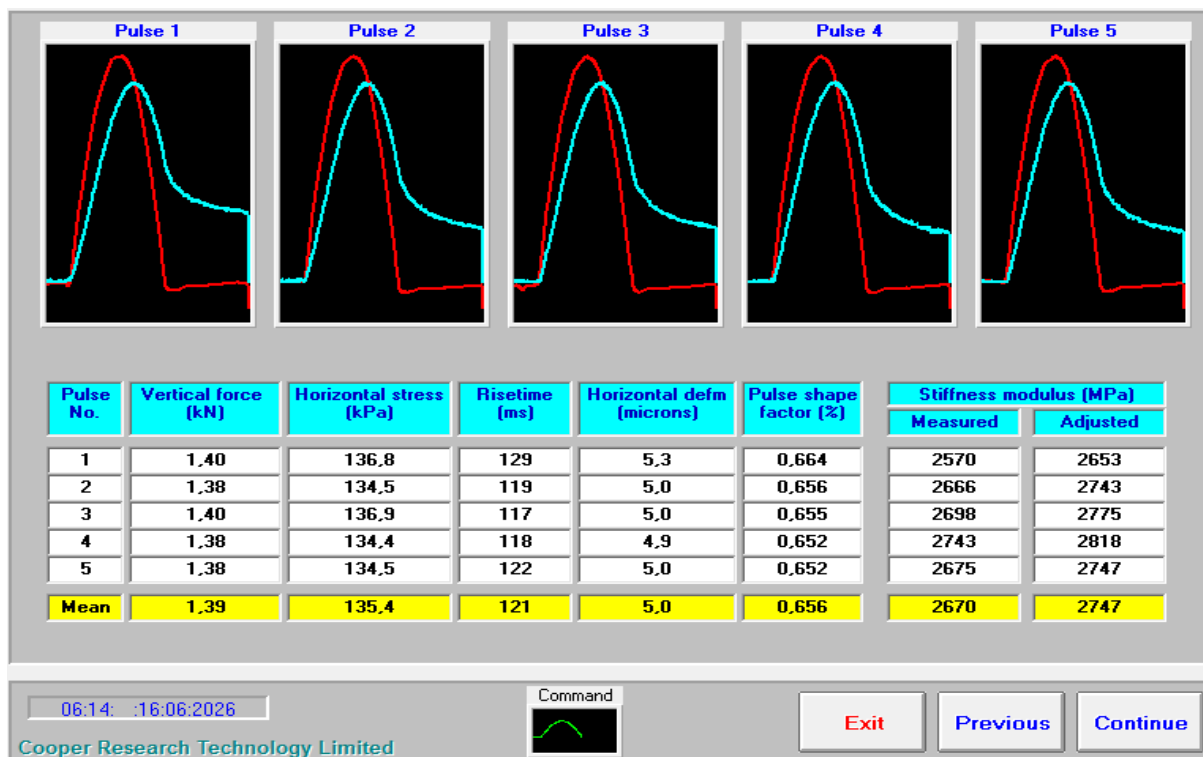
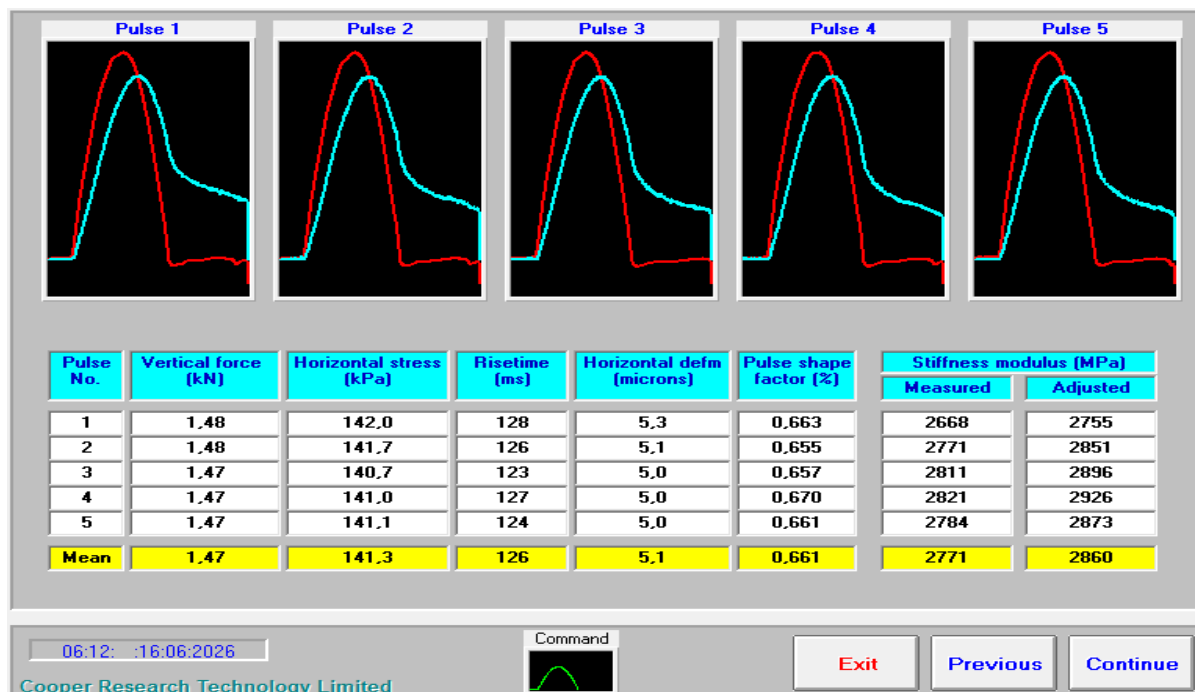
Referencias

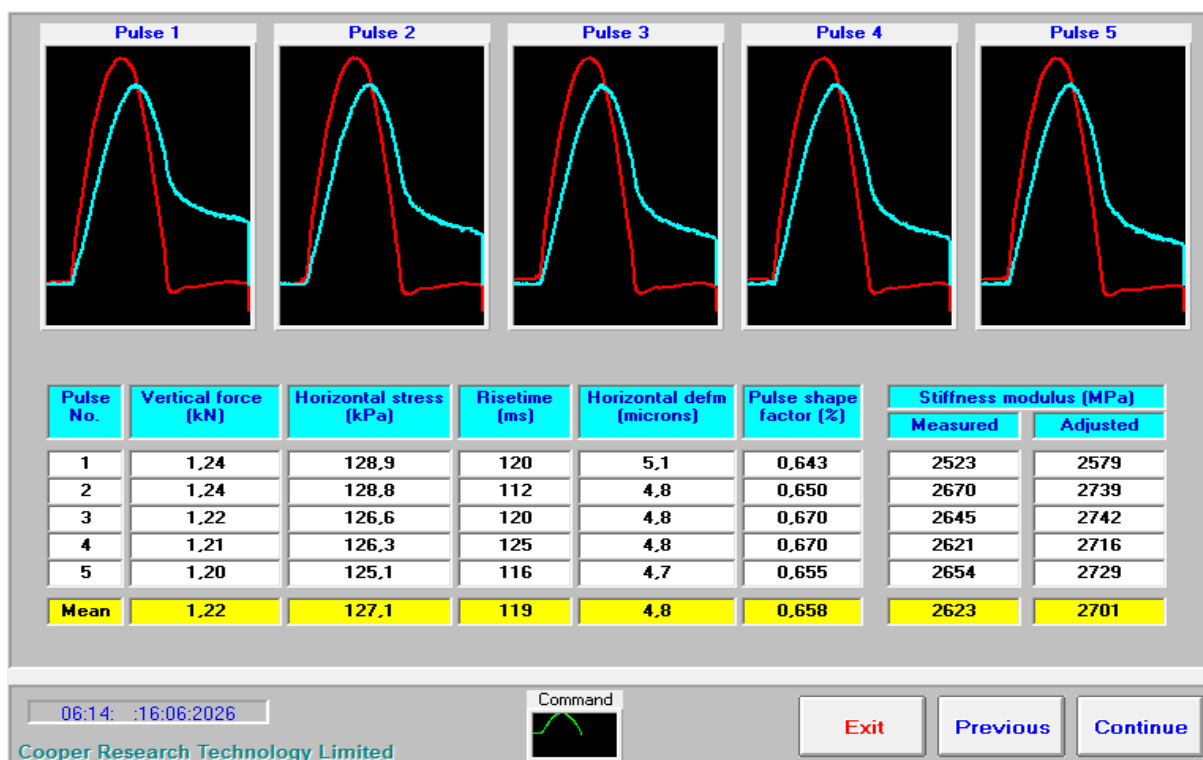
- Asphalt Institute. (2007). *The Asphalt Handbook* (7.^a ed.). Asphalt Institute.
- Asphalt Institute. (2014). *Asphalt mix design methods* (Manual Series No. 2, MS-2) (7.^a ed.). Asphalt Institute.
- ASTM International. (2014). *Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)* (ASTM D36/D36M-14). https://doi.org/10.1520/D0036_D0036M-14
- ASTM International. (2021). *Standard test method for elastic recovery of asphalt materials by ductilometer* (ASTM D6084/D6084M-21). ASTM International. https://doi.org/10.1520/D6084_D6084M-21
- Icaza Preciado, K. A., & Mera Intriago, W. A. (2018). *Influencia de los asfaltos mejorados con rejuvenecedores en el comportamiento de las mezclas asfálticas* [Trabajo de titulación de pregrado, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil]. Repositorio Institucional de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2014). *Productos derivados del petróleo: Cemento asfáltico (Clasificación por viscosidad)*.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). Método de ensayo para medir la recuperación elástica de materiales asfálticos utilizando el ductilímetro (INV E-742-13).
- Loría-Salazar, L. G., Cuadrado-Valbuena, J. M., Villegas-Villegas, R. E., & Castillo-Camarena, E. A. (2024). Introducción a los cementos y ligantes asfálticos: caracterización, reología y producción.
- Mego Farias, A. S. (2020). Estudio de procesos del proyecto: “Creación del Laboratorio de Materiales Kinlab S.A.C.” - Informe N.º 20: Recuperación elástica por torsión de asfaltos modificados (MTC E320). Scribd.
- Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones. (2002). *Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes MOP-001-F*.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2000). *MTC E 320: Recuperación elástica por torsión de asfaltos modificados*. Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

- SISTEQ Control. (s.f.). Aparato de recuperación elástica por torsión para asfaltos modificados [Fotografía]. Recuperado de <https://www.sisteqcontrol.com/productos/aparato-recuperacion-elastica-torsion-asfaltos-modificados-asf0040e109>.
- Sripath Technologies. (2021). NuMIXER: Asphalt Modifier Oil. Recuperado de <https://sripath.com/products/numixer/>
- Sripath Technologies. (2021). PGXpand: A Unique Innovative Polymer Additive. Recuperado de <https://sripath.com/products/pgxexpand/>
- Sripath Technologies. (2022). ReLIXER: Asphalt Rejuvenator Recycling Agent. Recuperado de <https://sripath.com/products/relixer/>
- STM International. (2017). *Standard Test Method for Ductility of Bituminous Materials* (ASTM D113-17). <https://doi.org/10.1520/D0113-17>
- Yuan, Q., Liu, Z., Zheng, K., & Ma, C. (2021). Asphalt. En *Civil Engineering Materials* (pp. 287-325). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822865-4.00007-6>

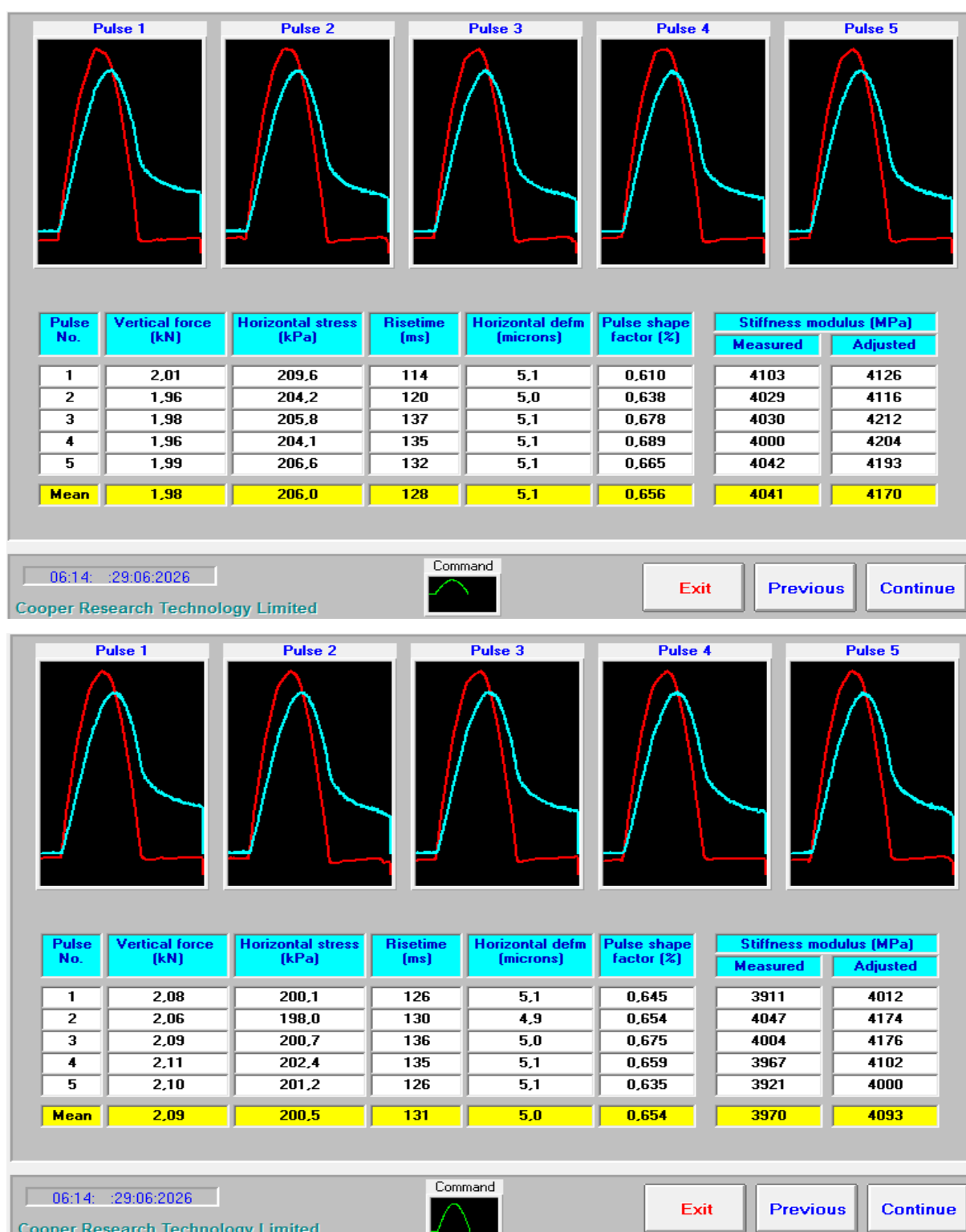
Anexos

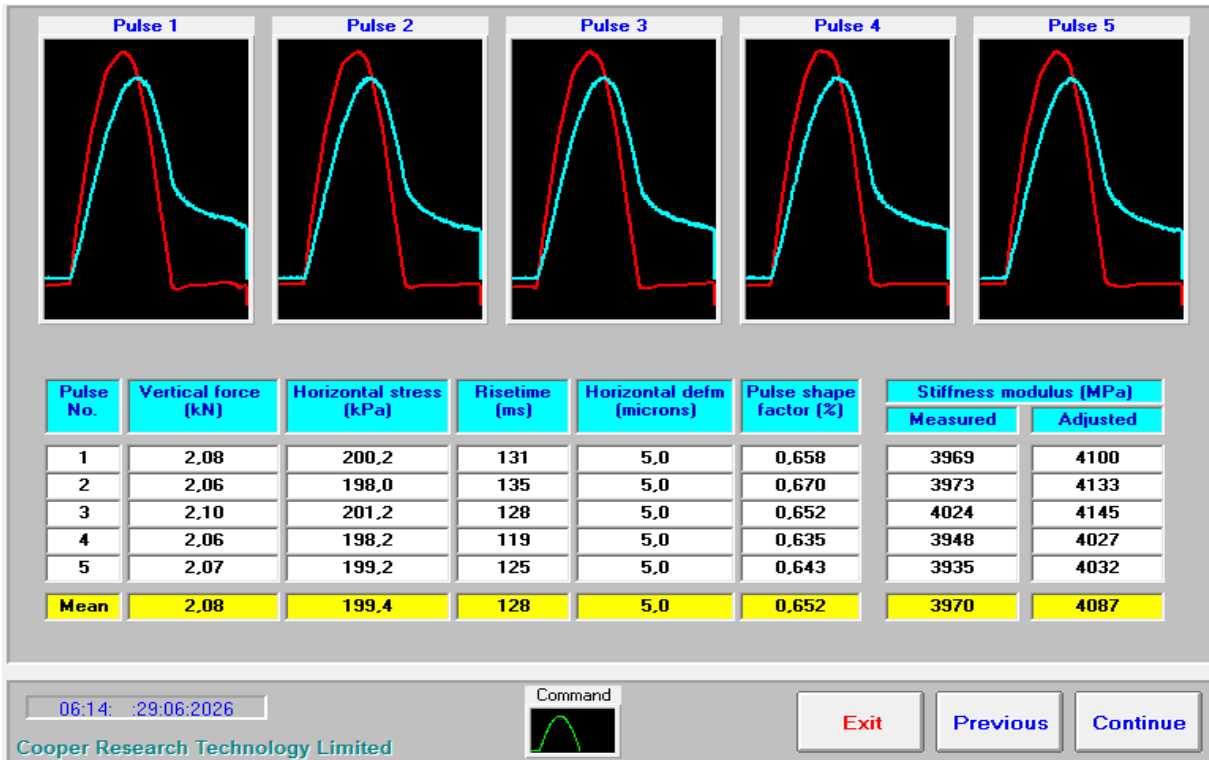
Anexo 1. Resultados de Módulo de rigidez obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica de referencia con envejecimiento a corto plazo.



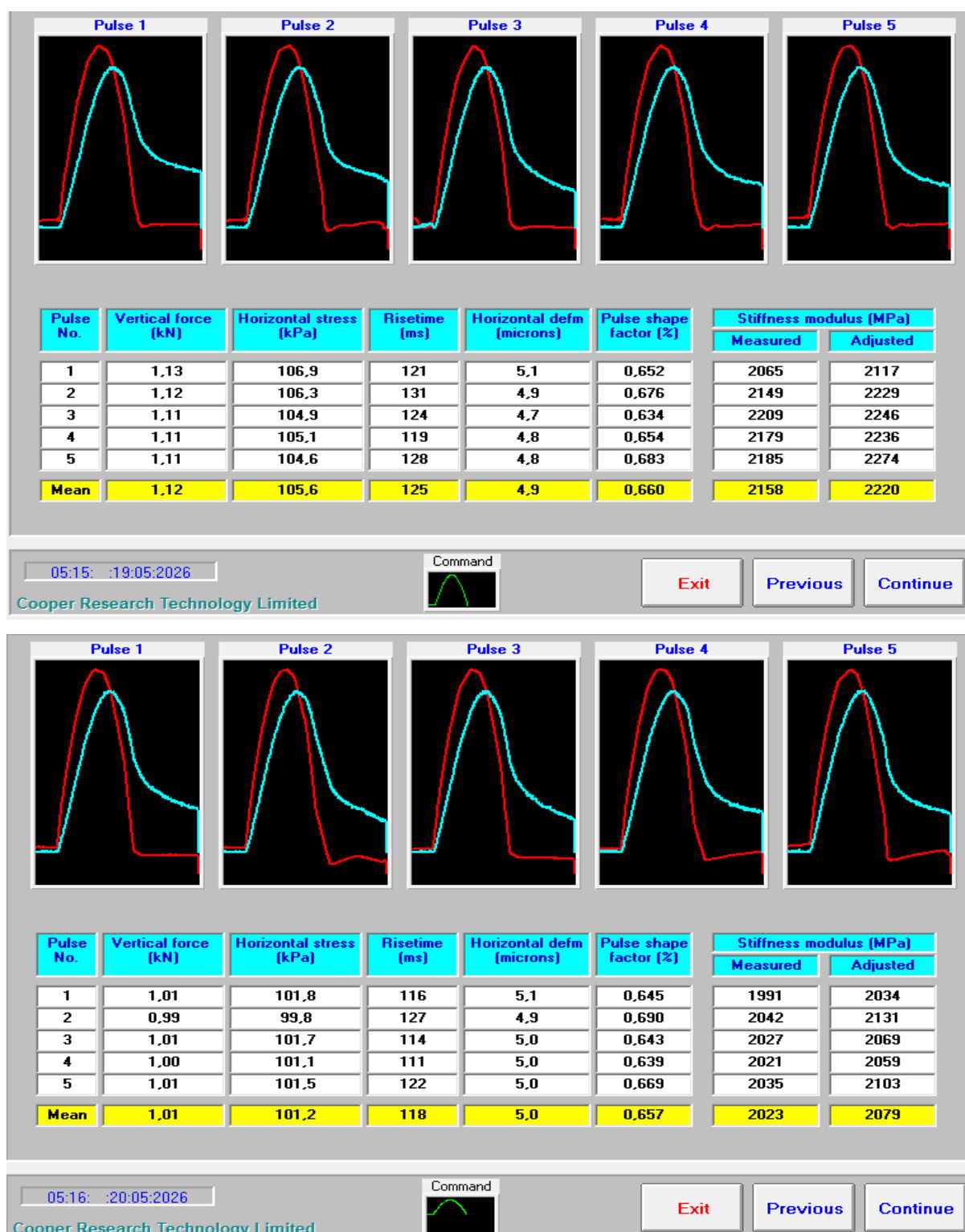


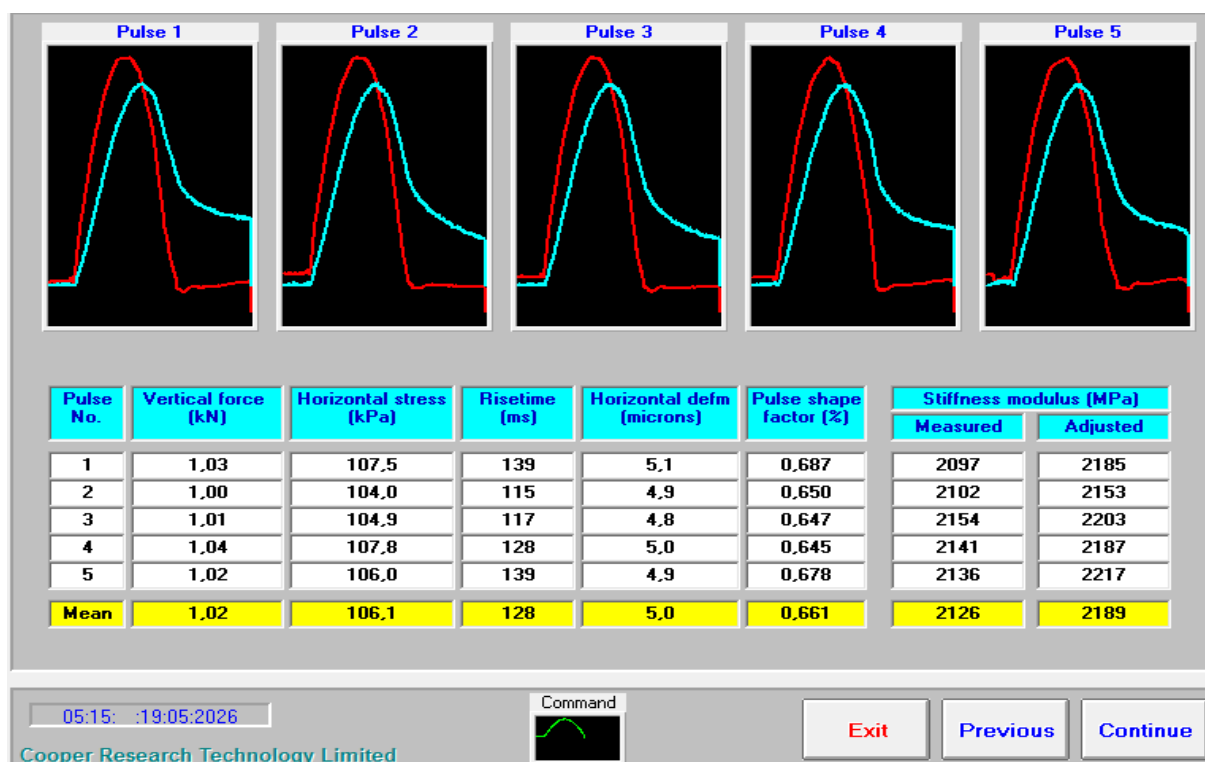
Anexo 2. Resultados de Módulo de rigidez obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica de referencia con envejecimiento a largo plazo.



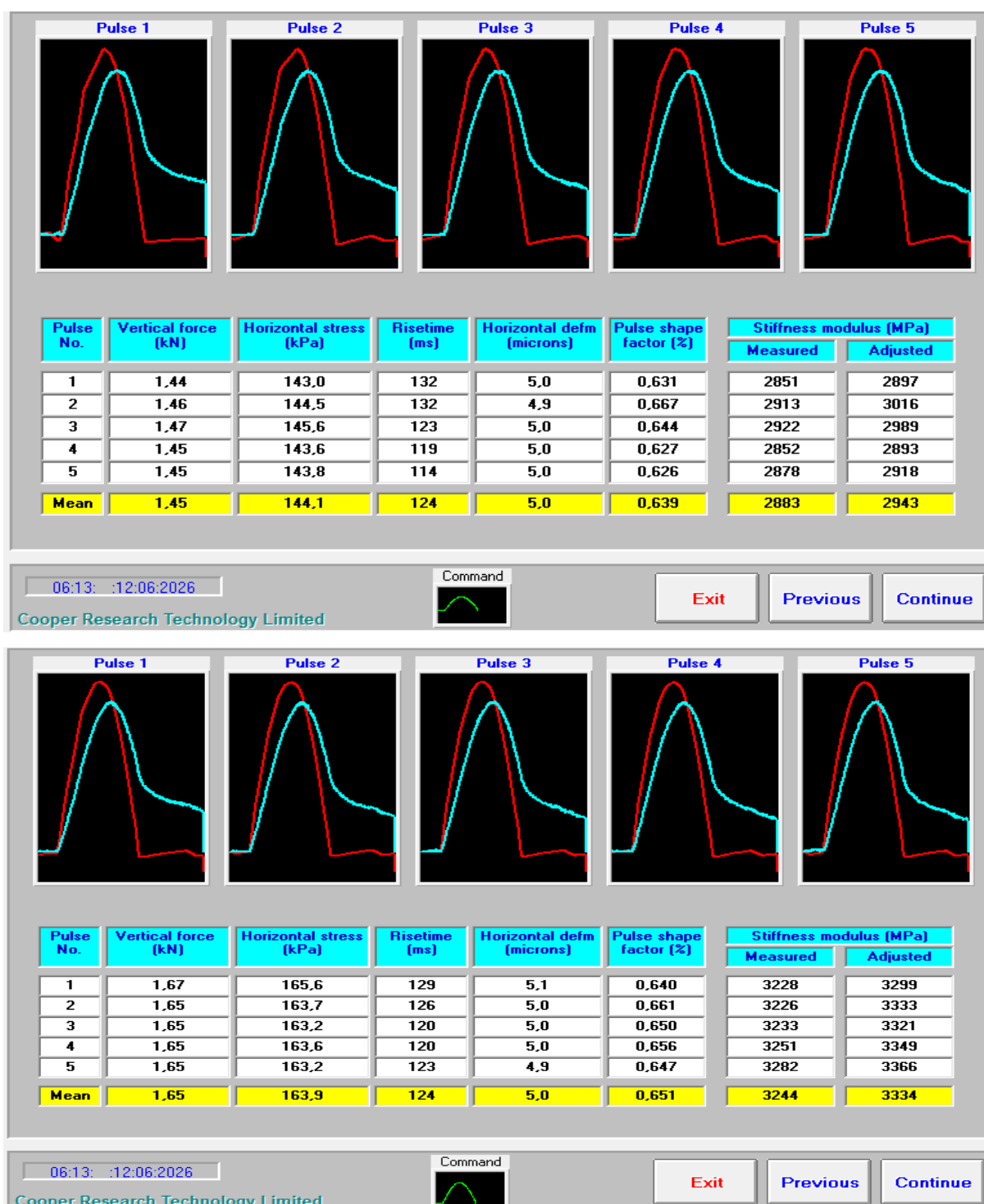


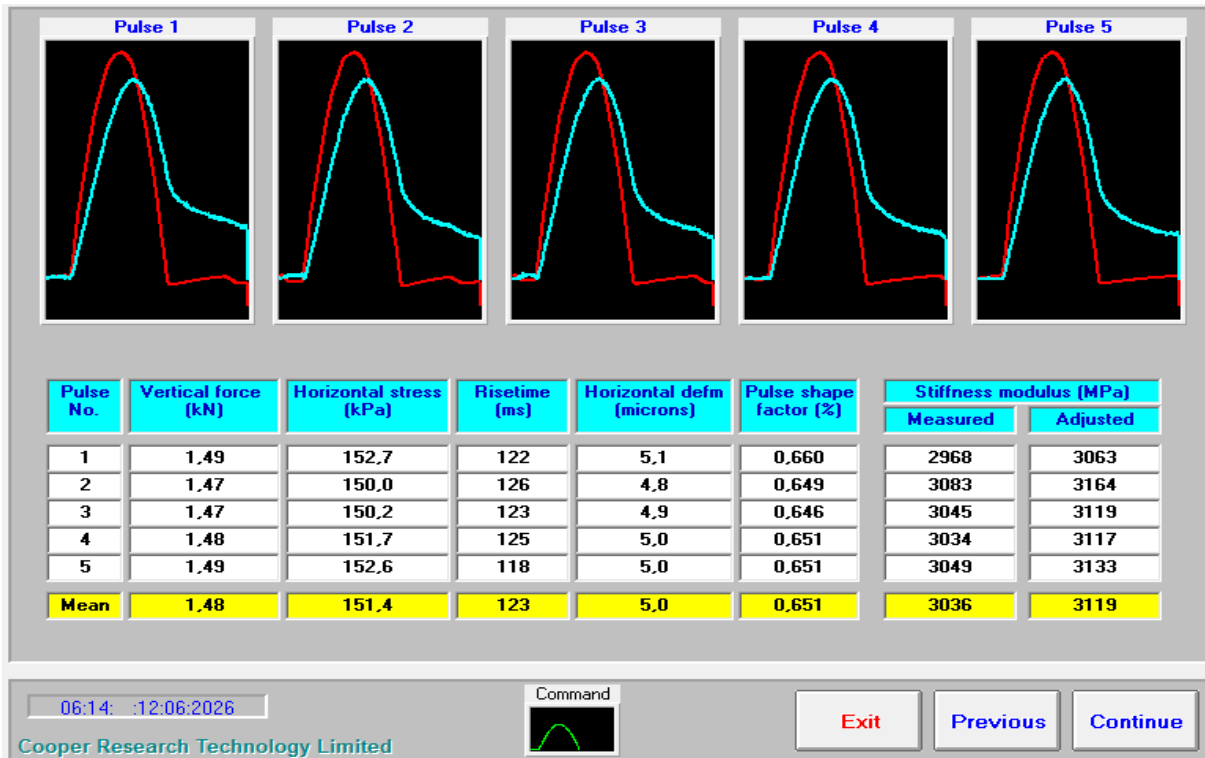
Anexo 3. Resultados de Módulo de rigidez obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica aditivada con ReLIXER con envejecimiento a corto plazo.



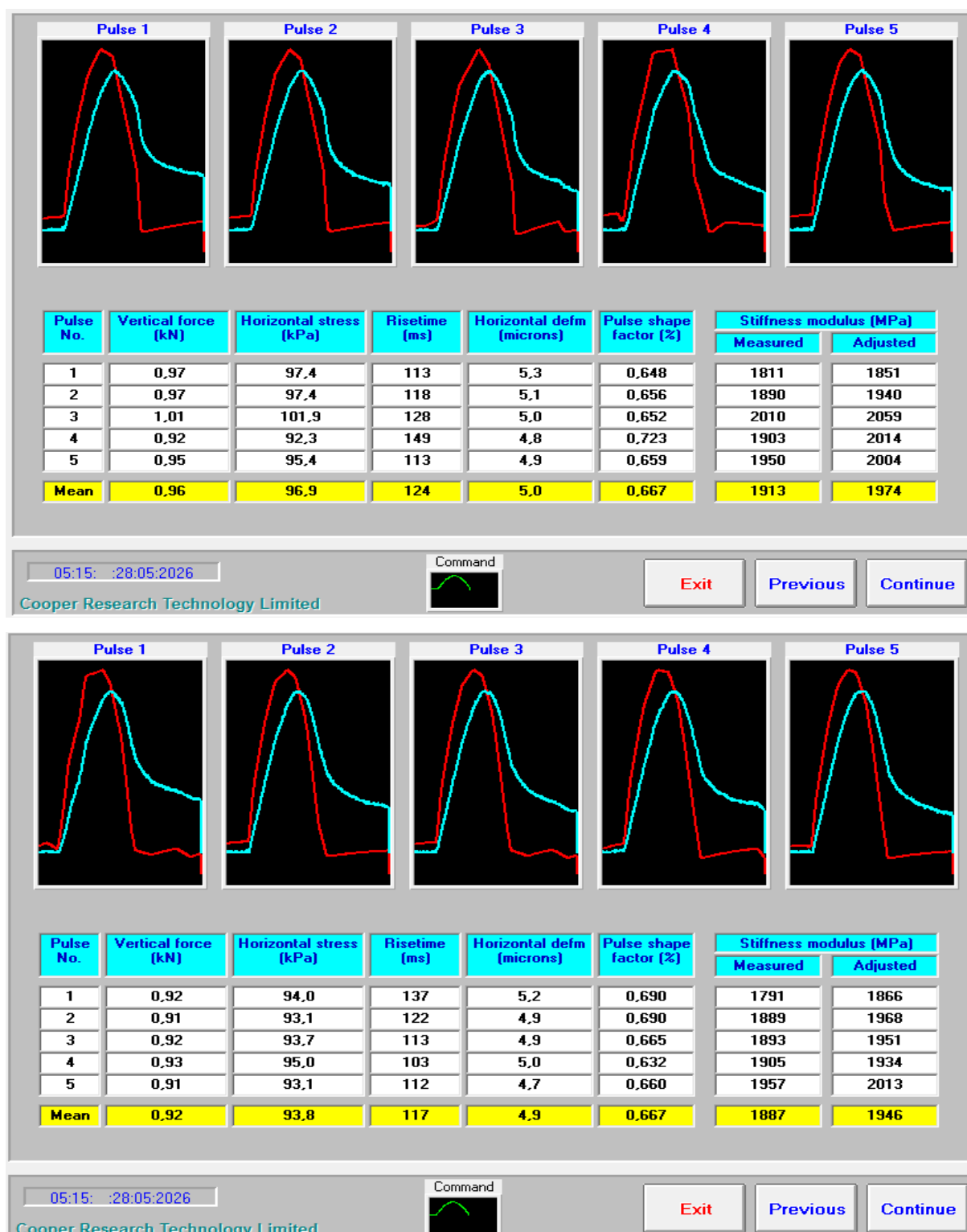


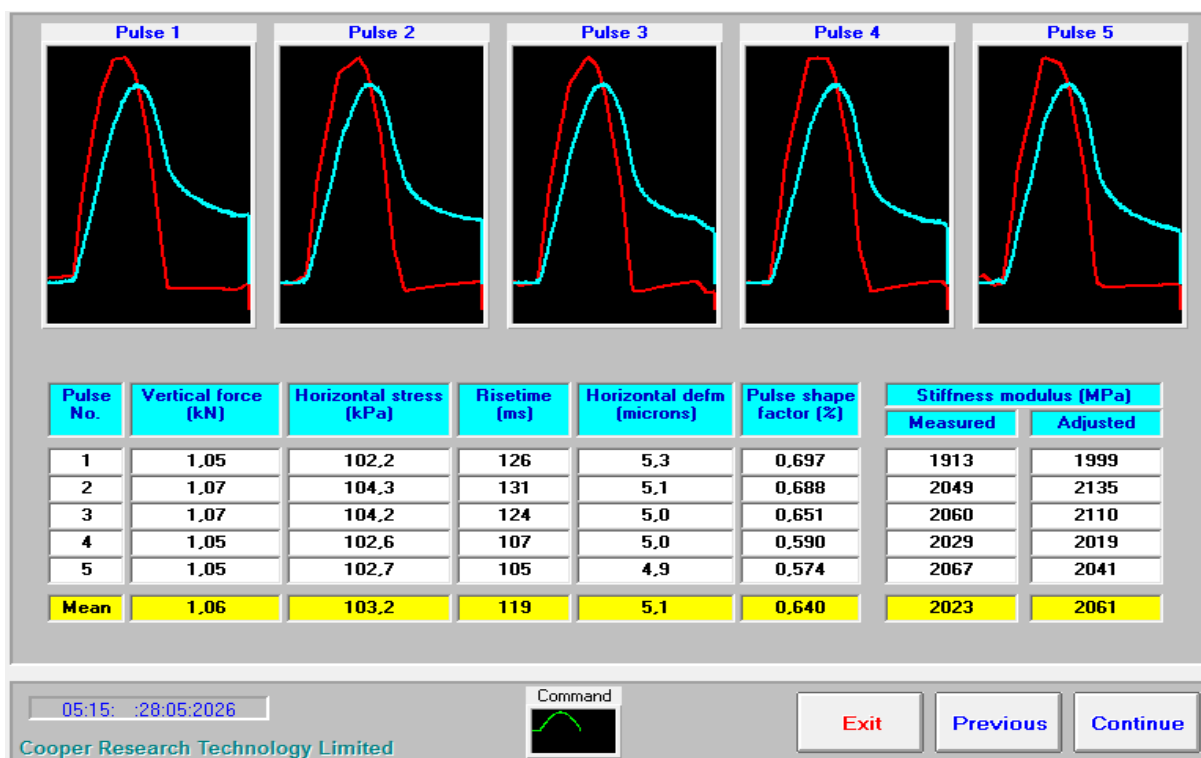
Anexo 4. Resultados de Módulo de rigidez obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica aditivada con ReLIXER con envejecimiento a largo plazo.



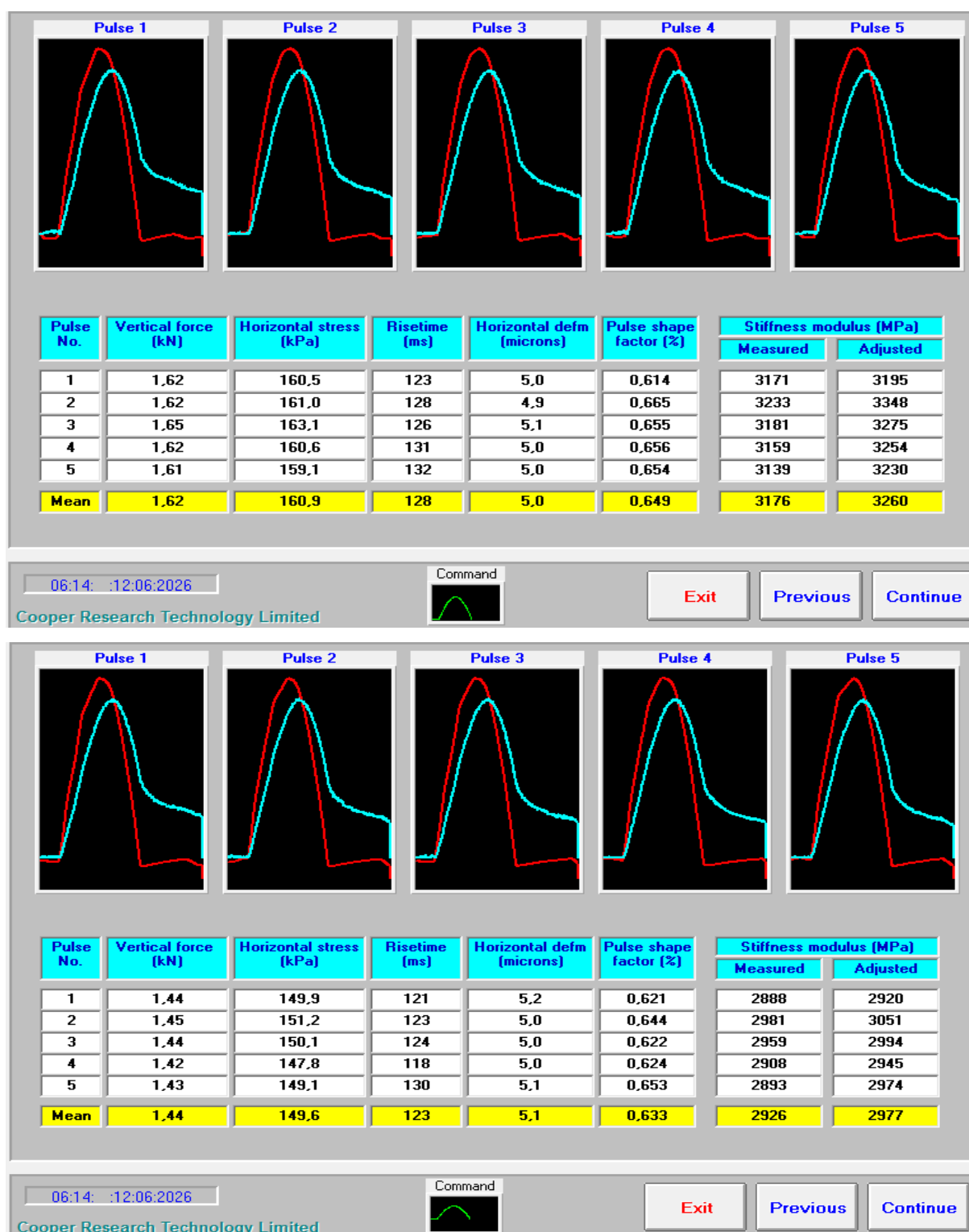


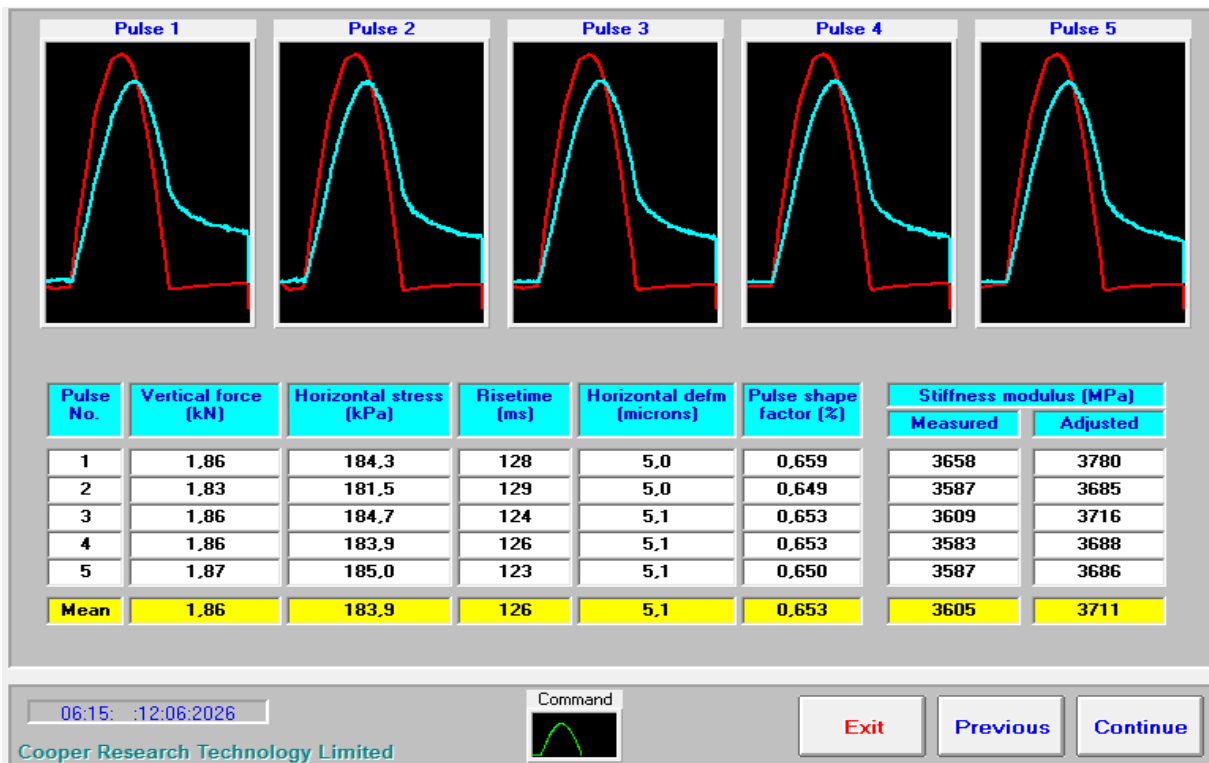
Anexo 5. Resultados de Módulo de rigidez obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica aditivada con NuMIXER con envejecimiento a corto plazo.



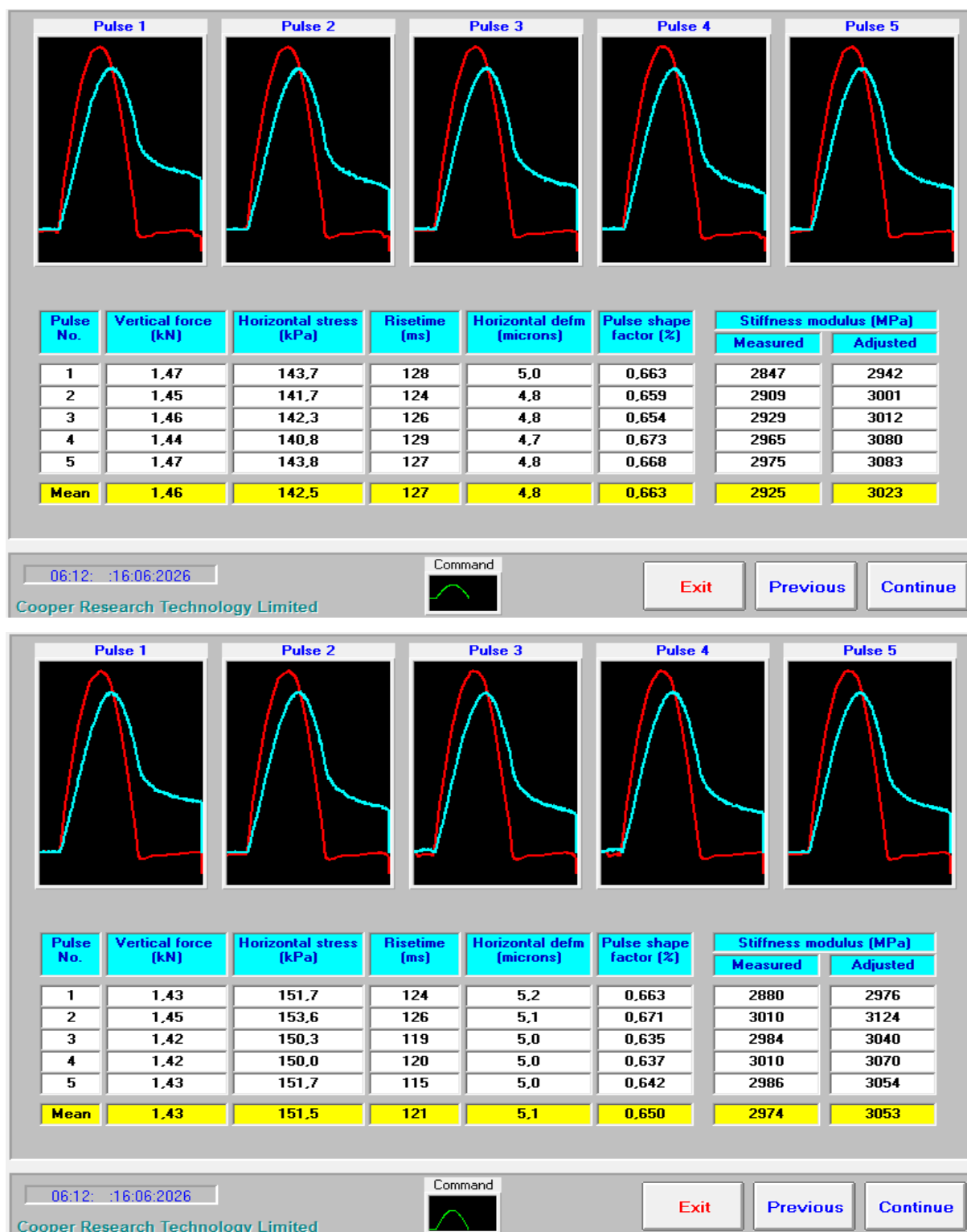


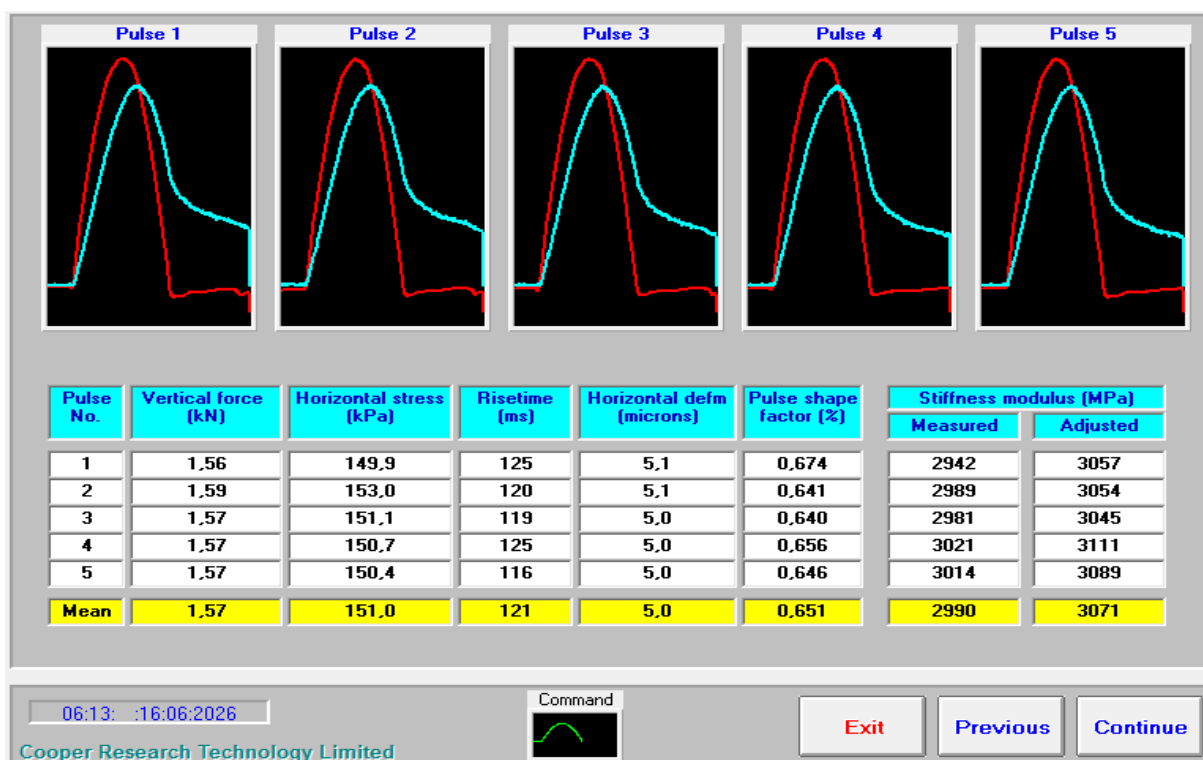
Anexo 6. Resultados de Módulo de rigidez obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica aditivada con NuMIXER con envejecimiento a largo plazo.



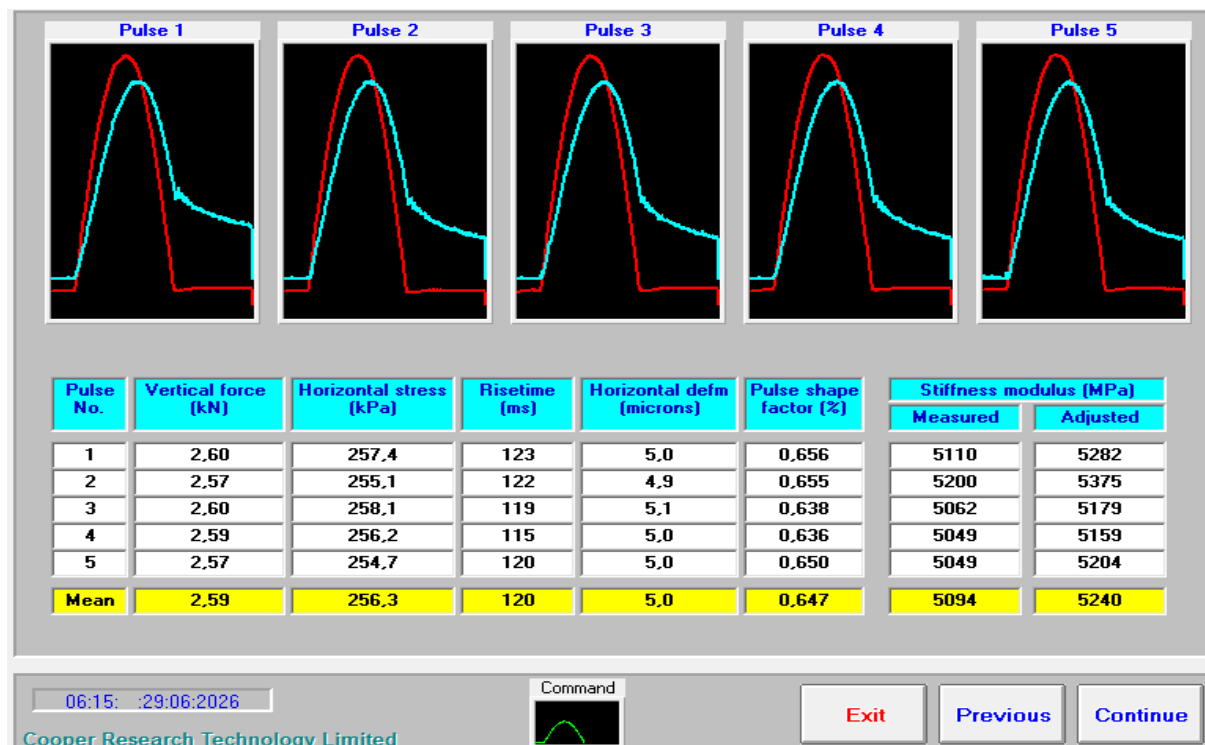
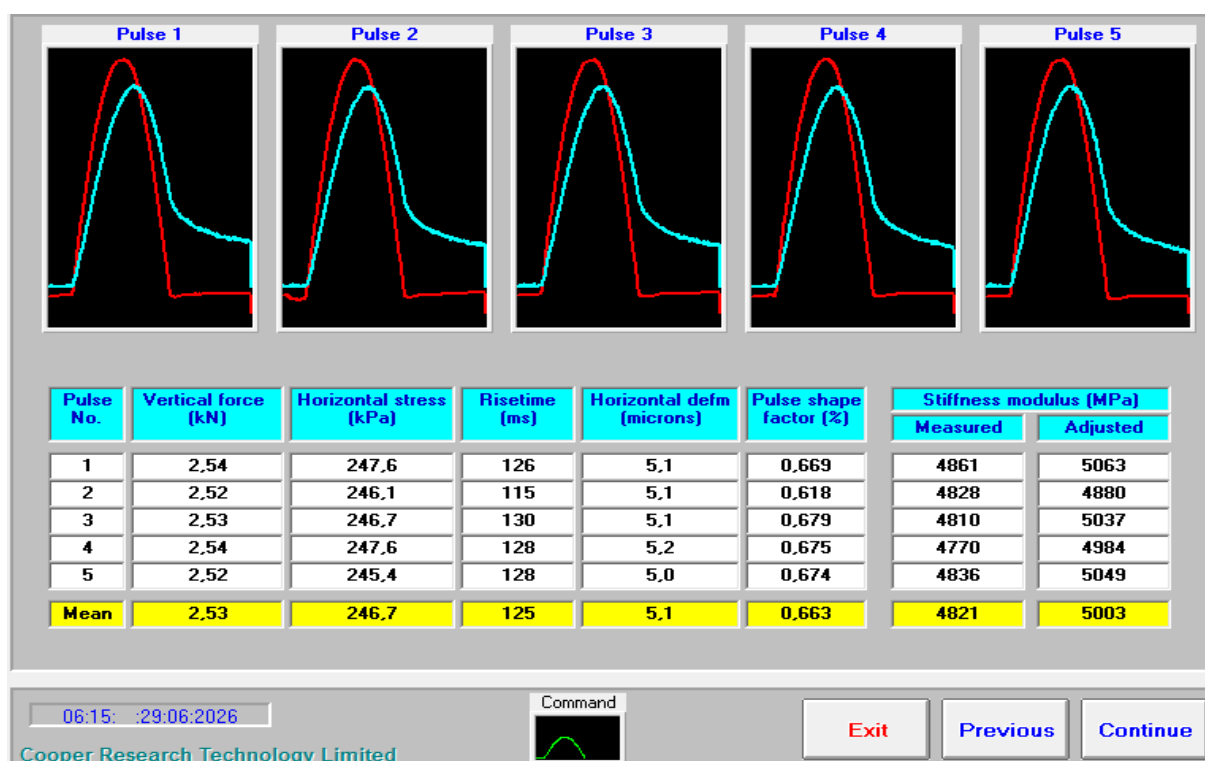


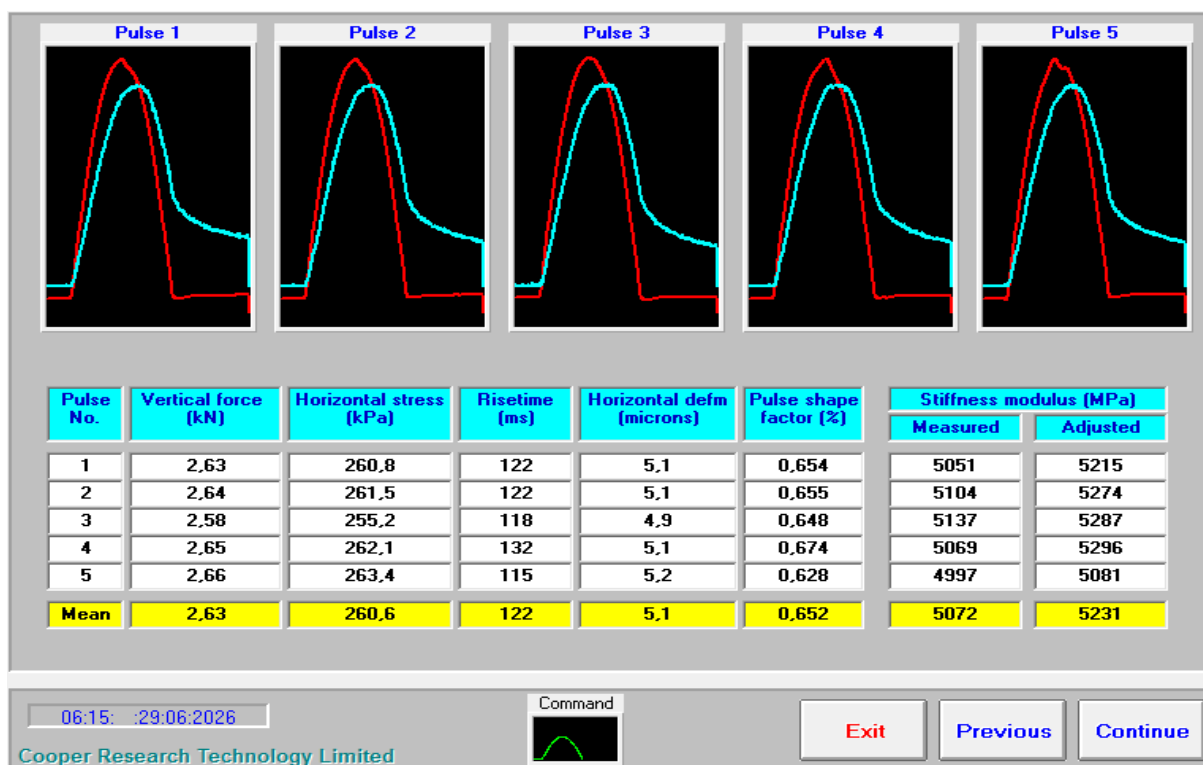
Anexo 7. Resultados de Módulo de rigidez obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica aditivada con PGXpand con envejecimiento a corto plazo.



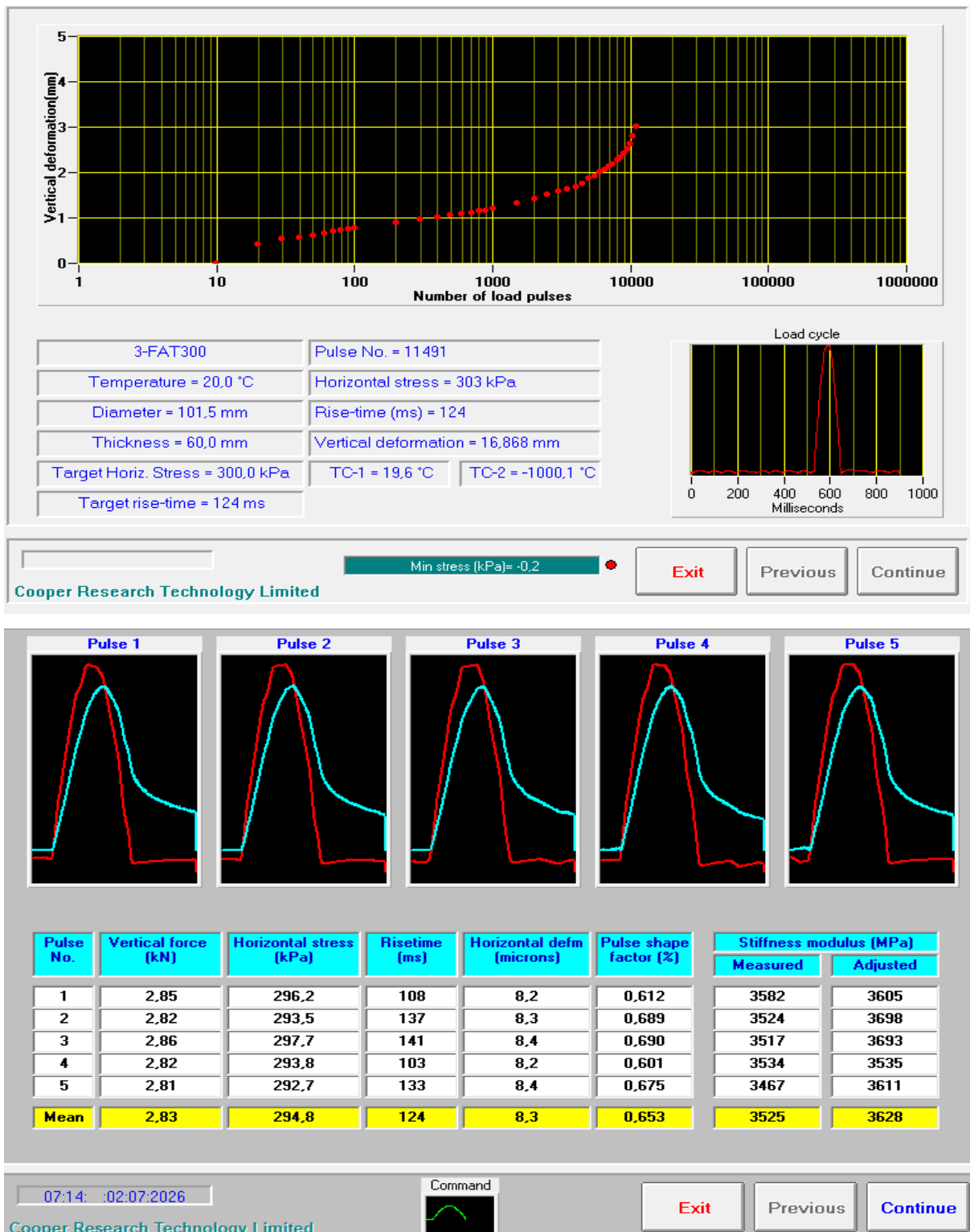


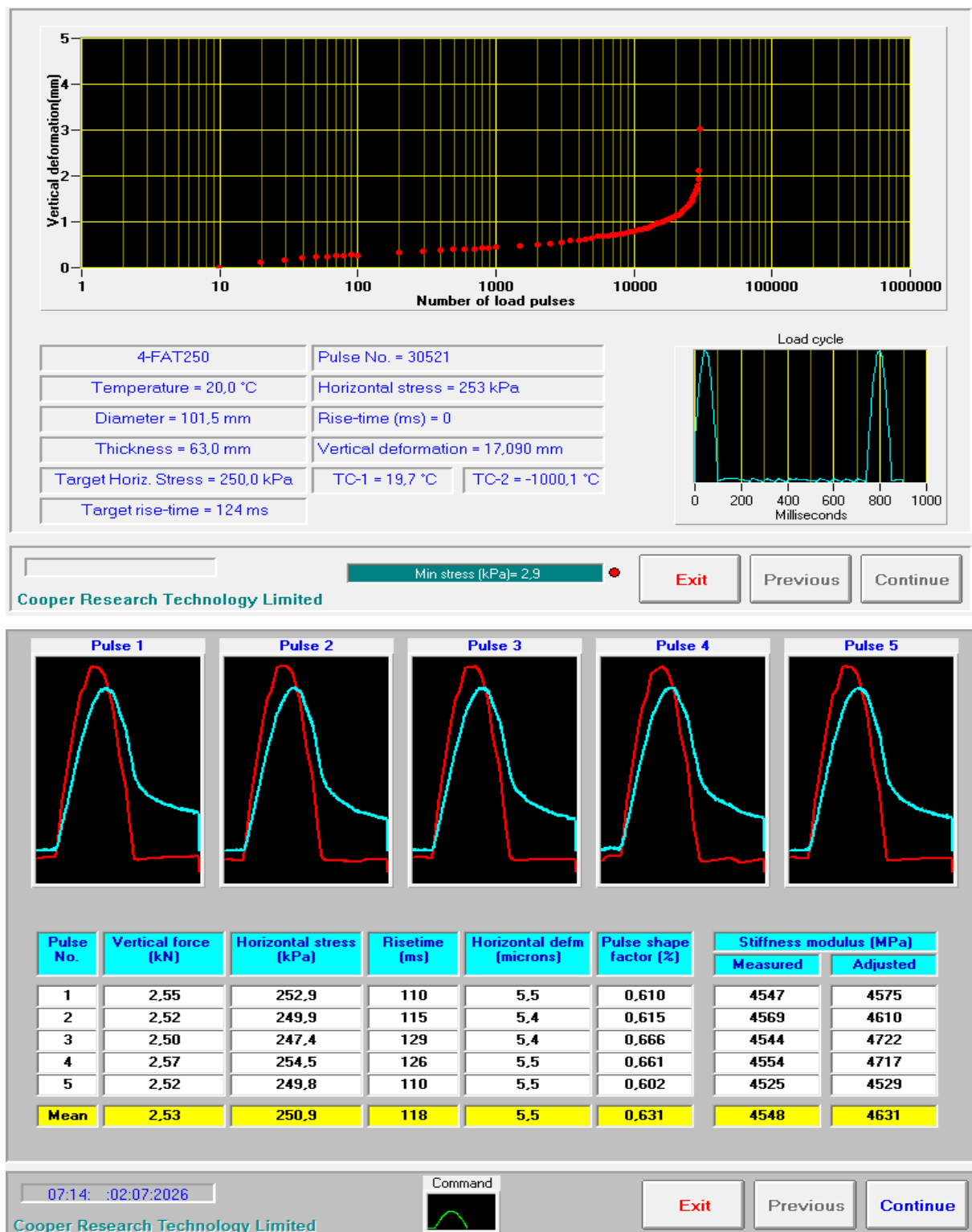
Anexo 8. Resultados de Módulo de rigidez obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica aditivada con PGXpand con envejecimiento a largo plazo.

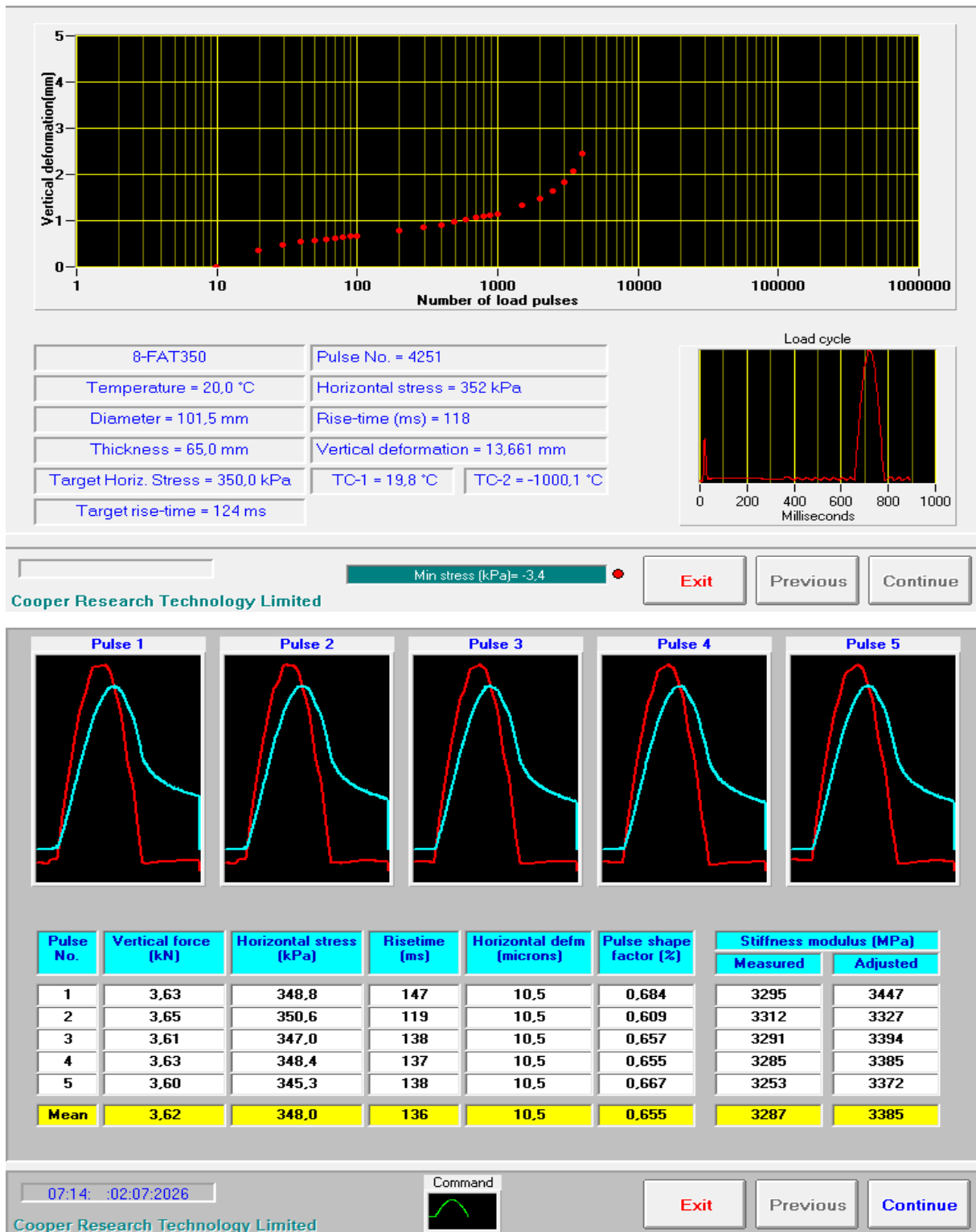




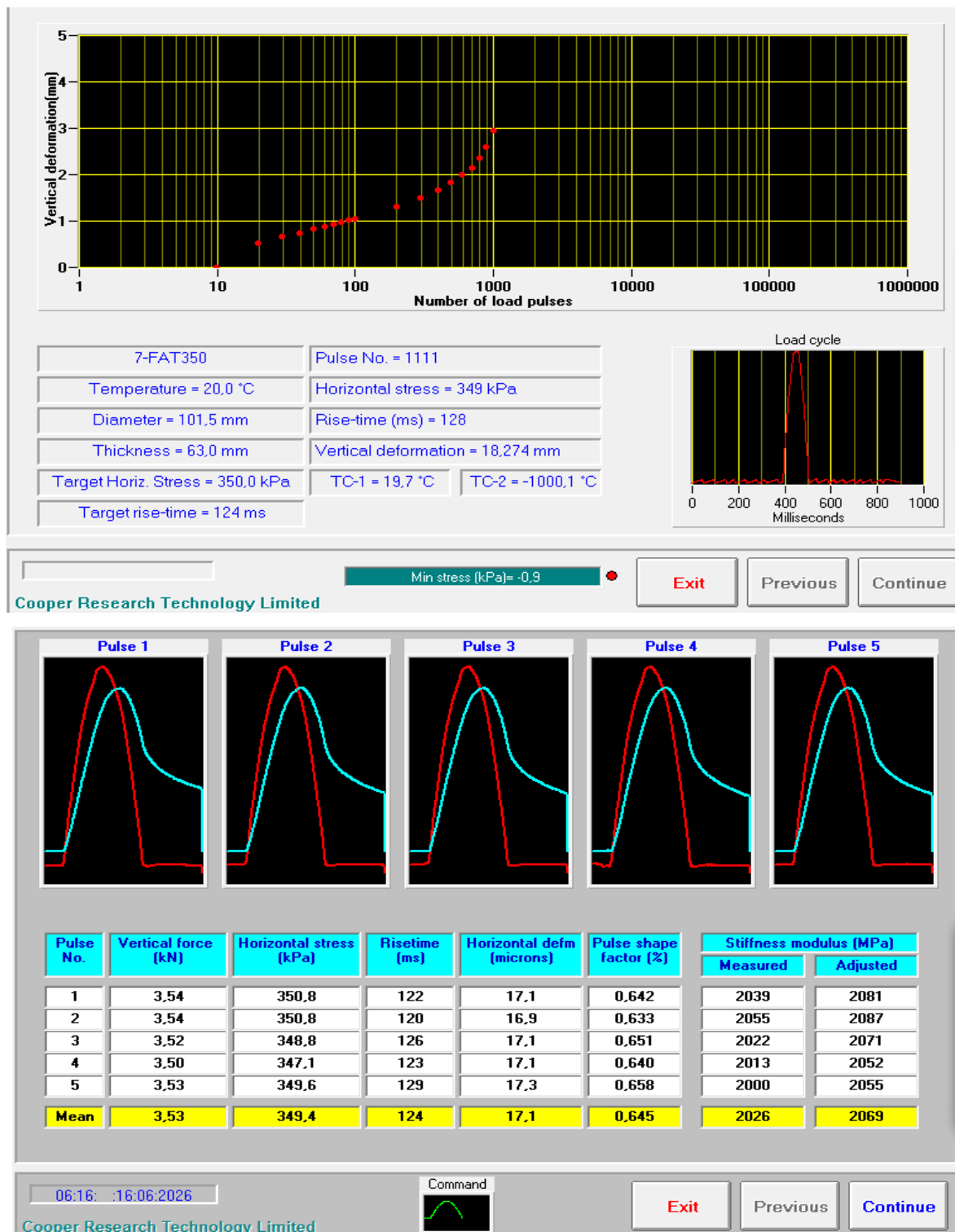
Anexo 9. Resultados de fatiga obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica de referencia con envejecimiento a largo plazo.

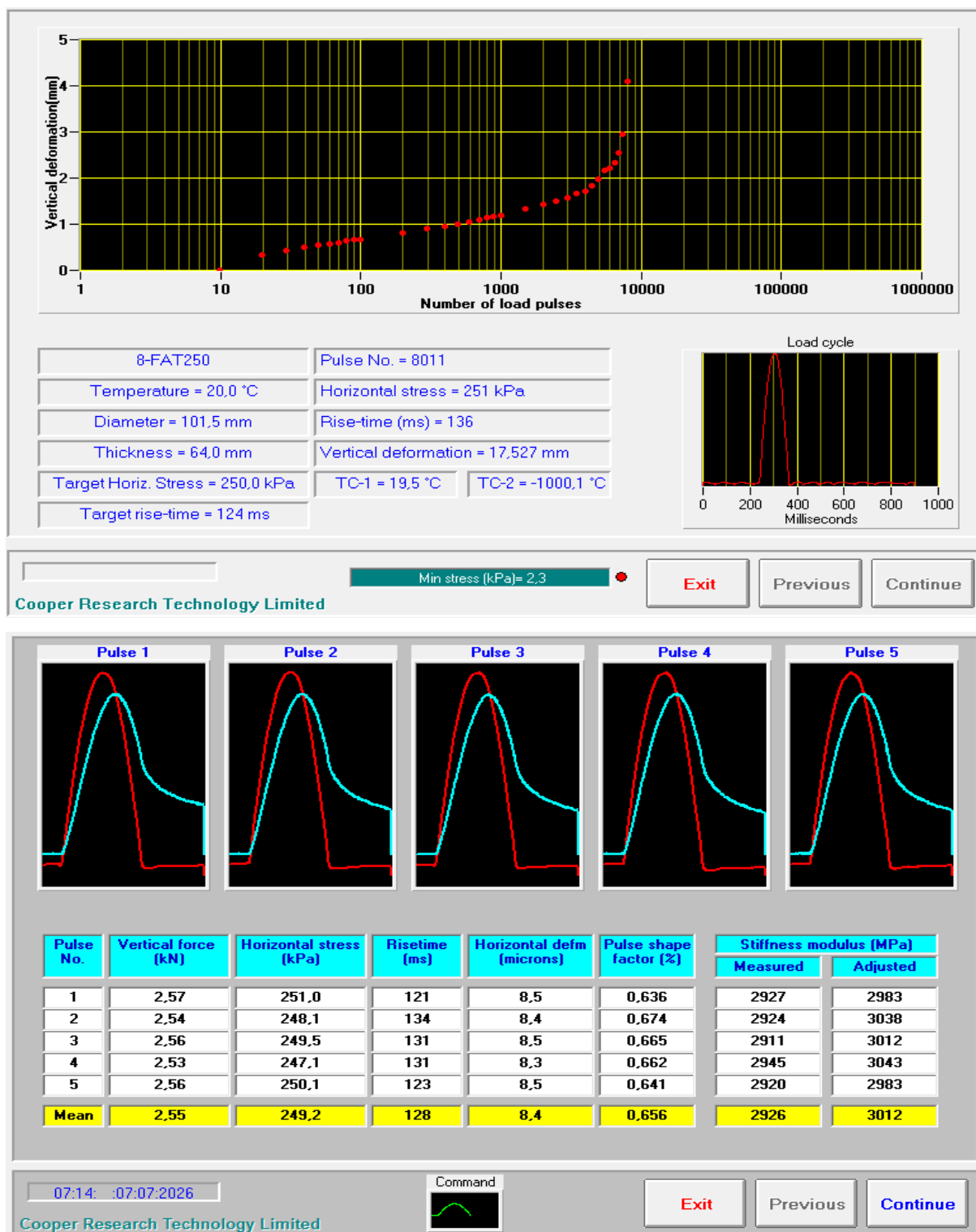


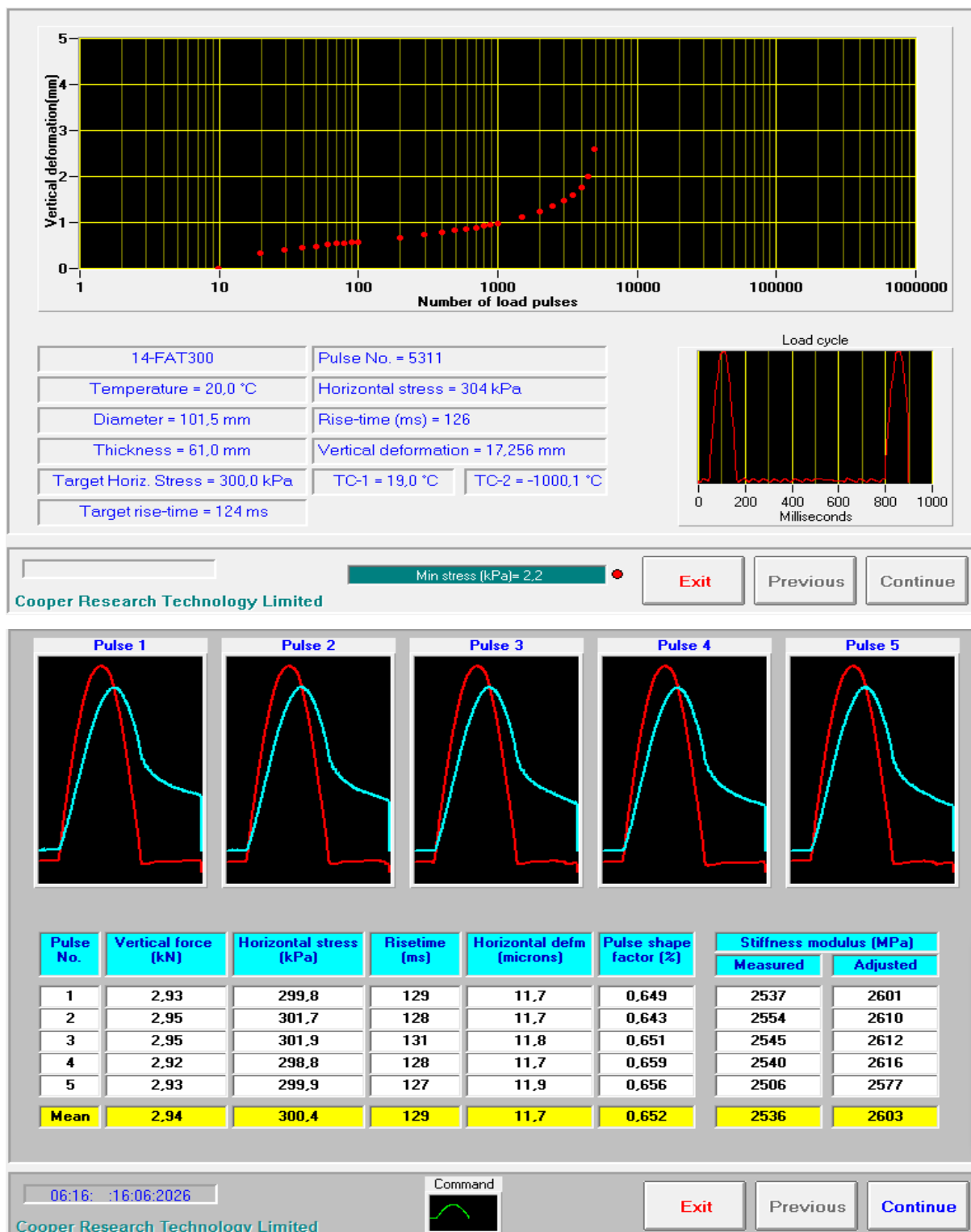




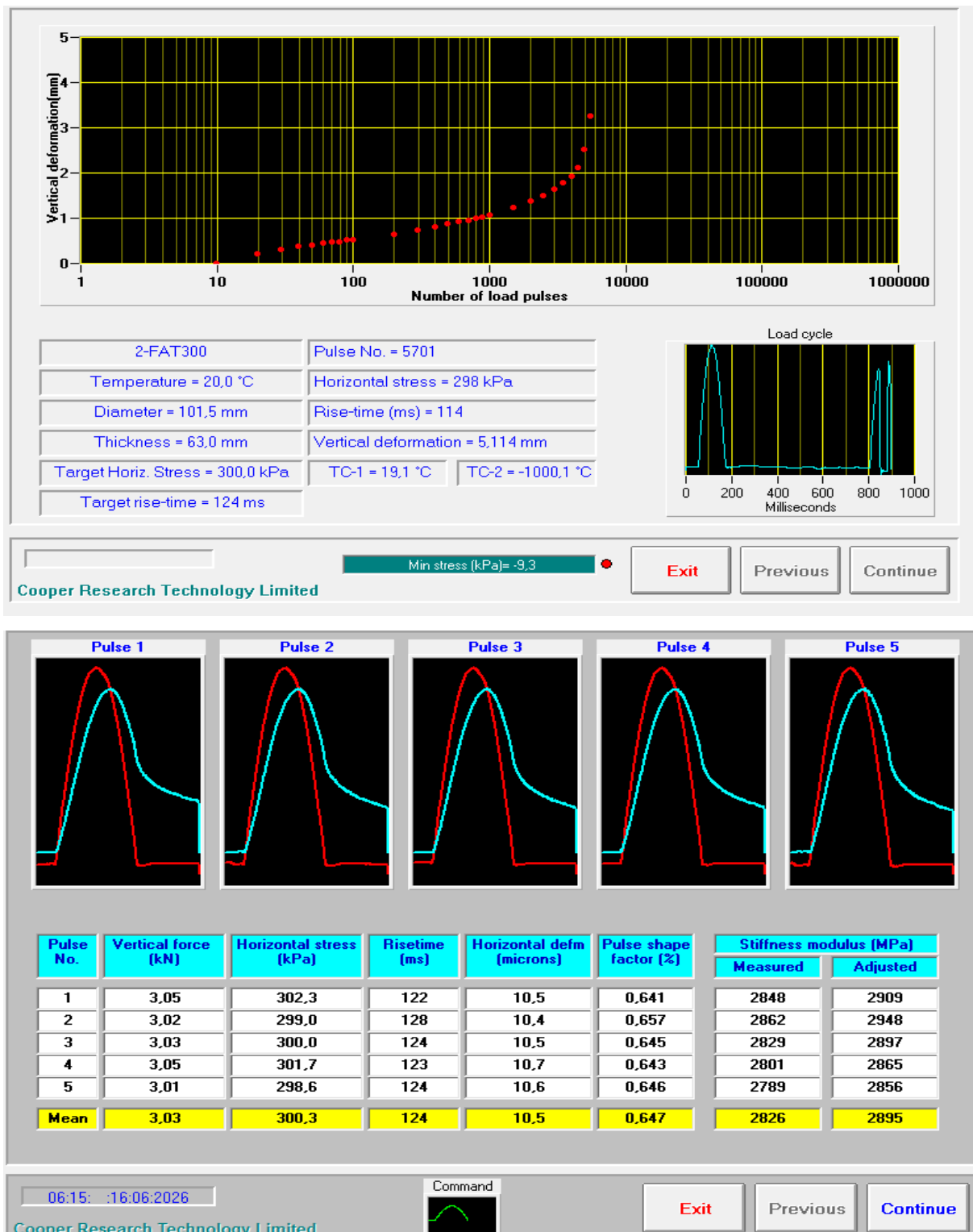
Anexo 10. Resultados de fatiga obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica aditivada con ReLIXER con envejecimiento a largo plazo.

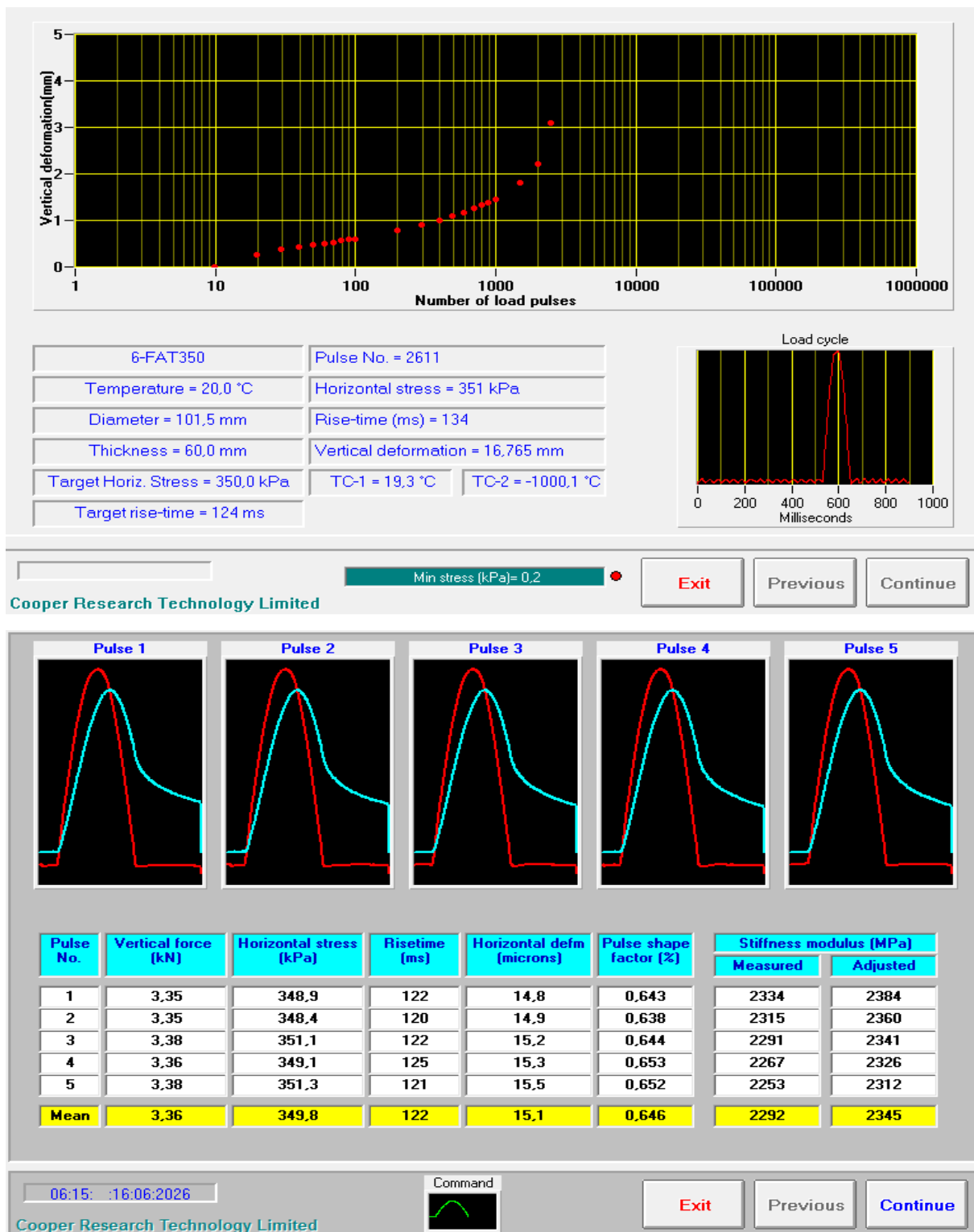


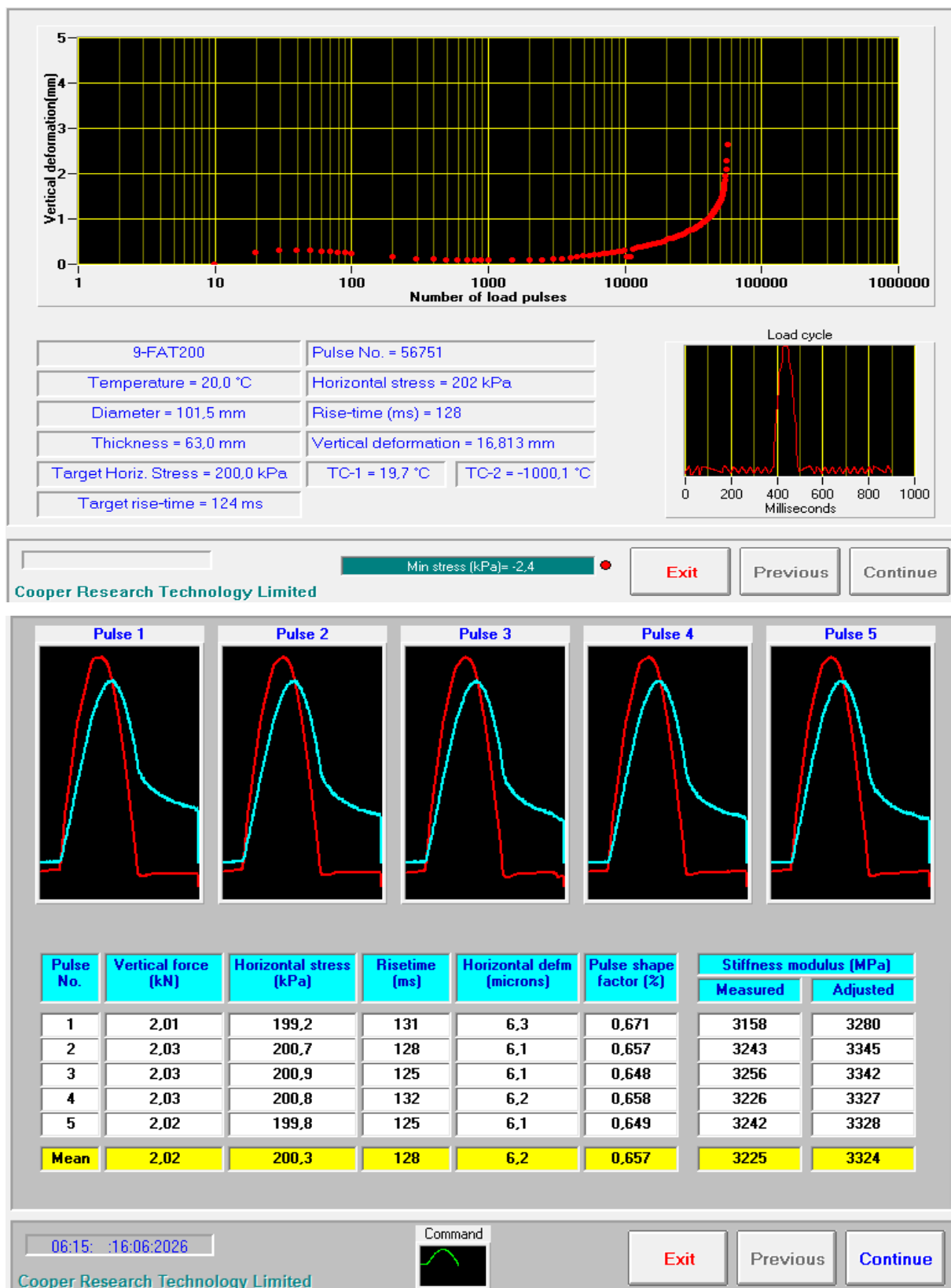




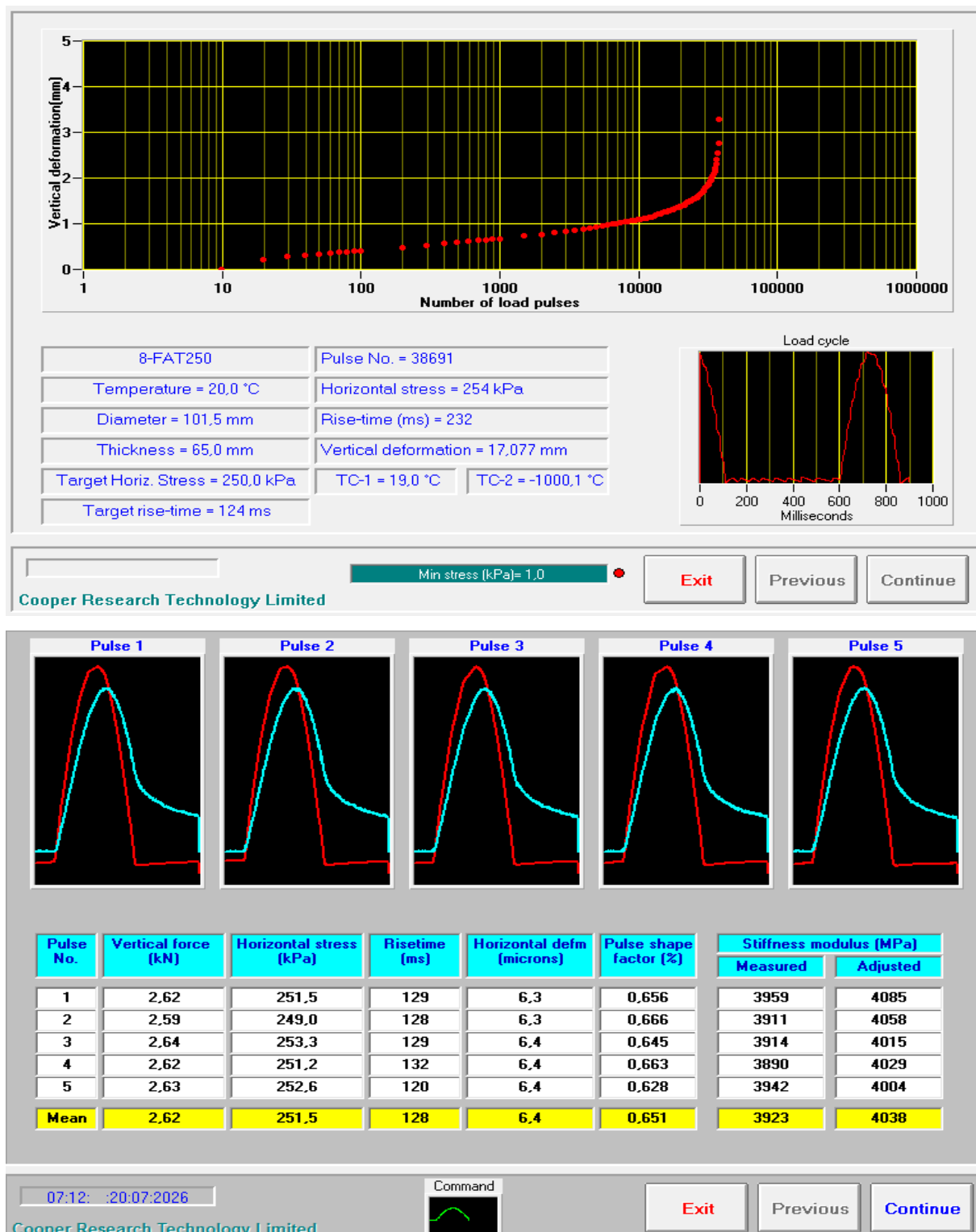
Anexo 11. Resultados de fatiga obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica aditivada con NuMIXER con envejecimiento a largo plazo.

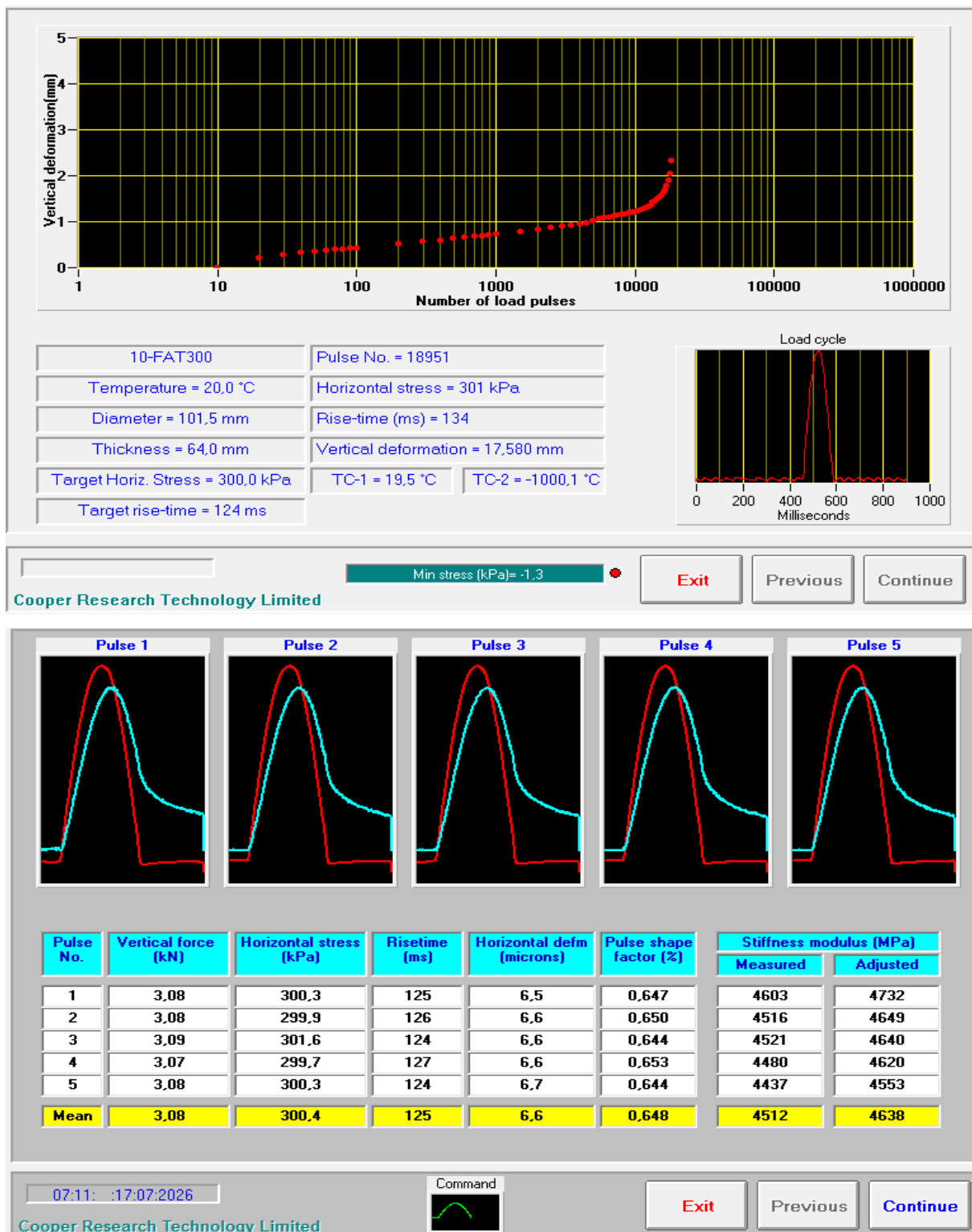


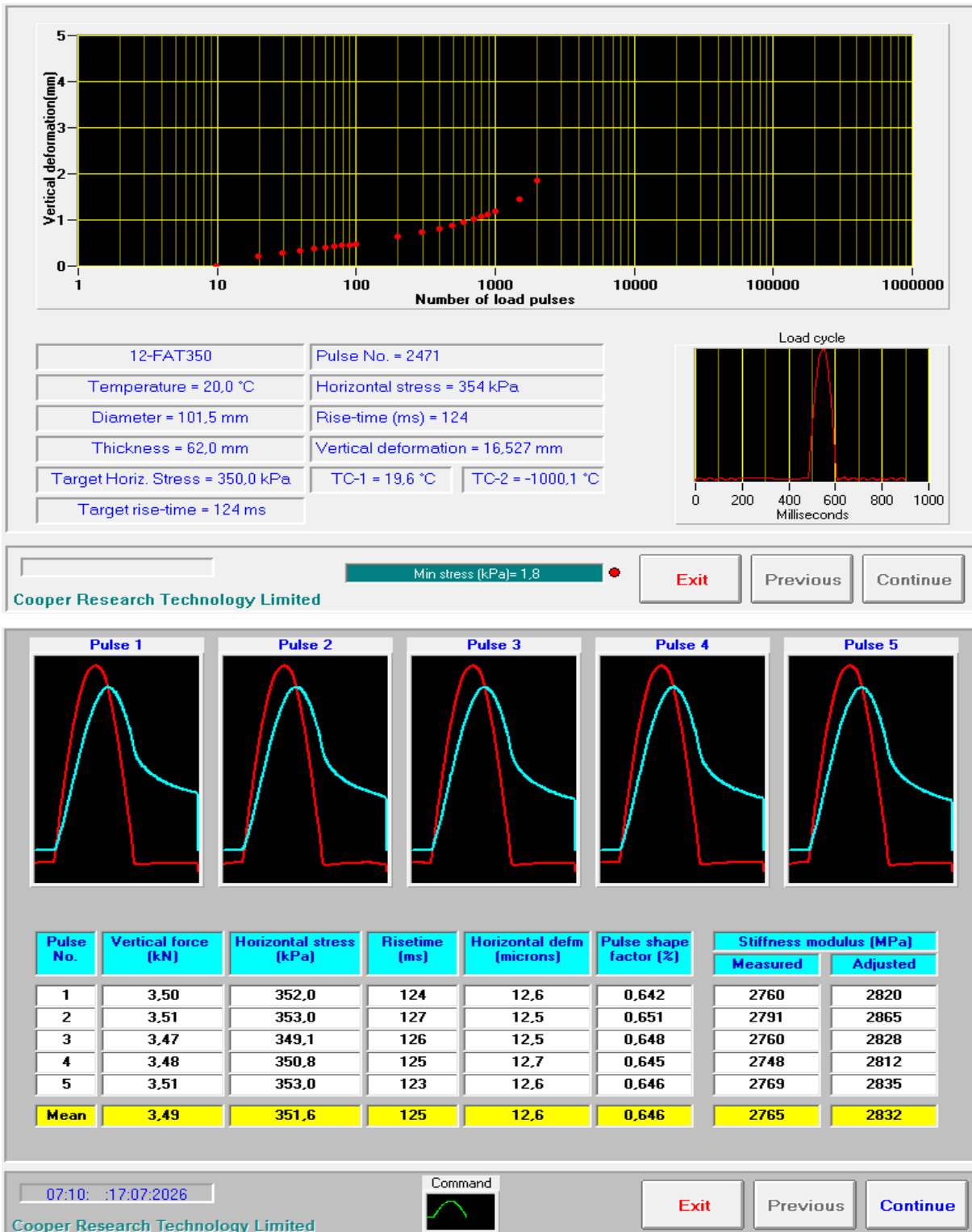




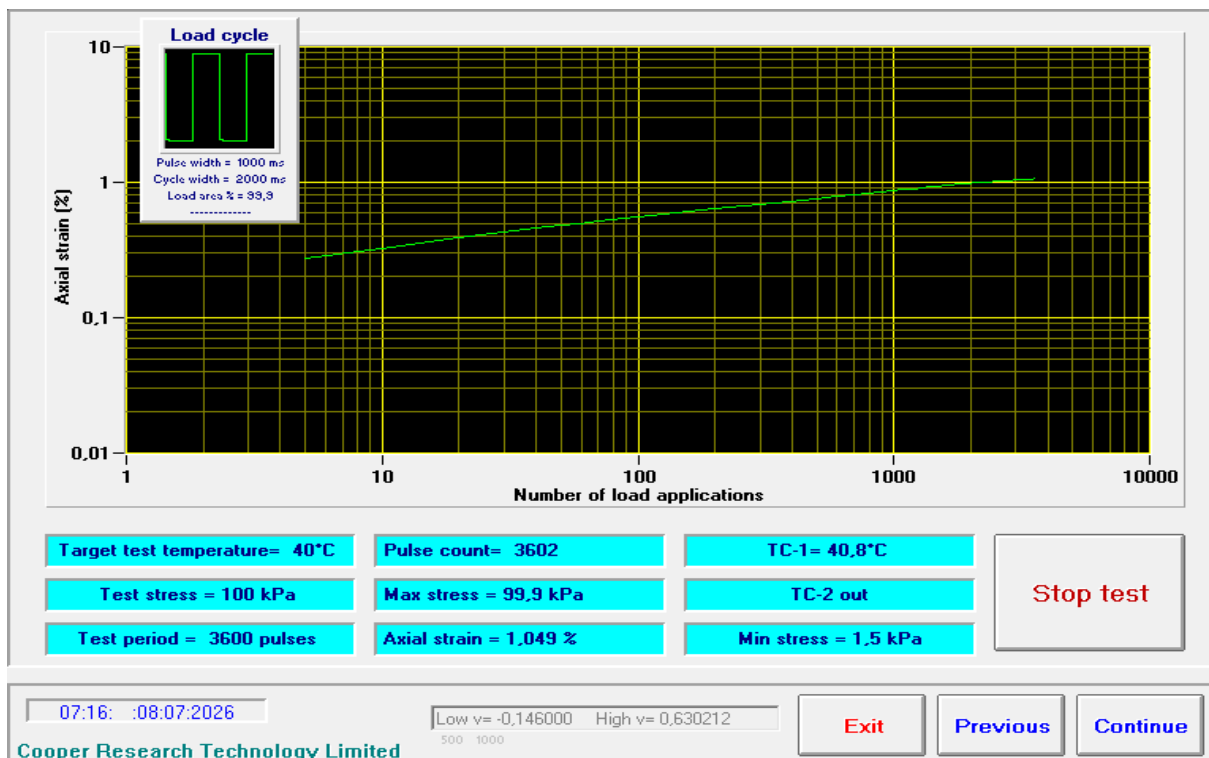
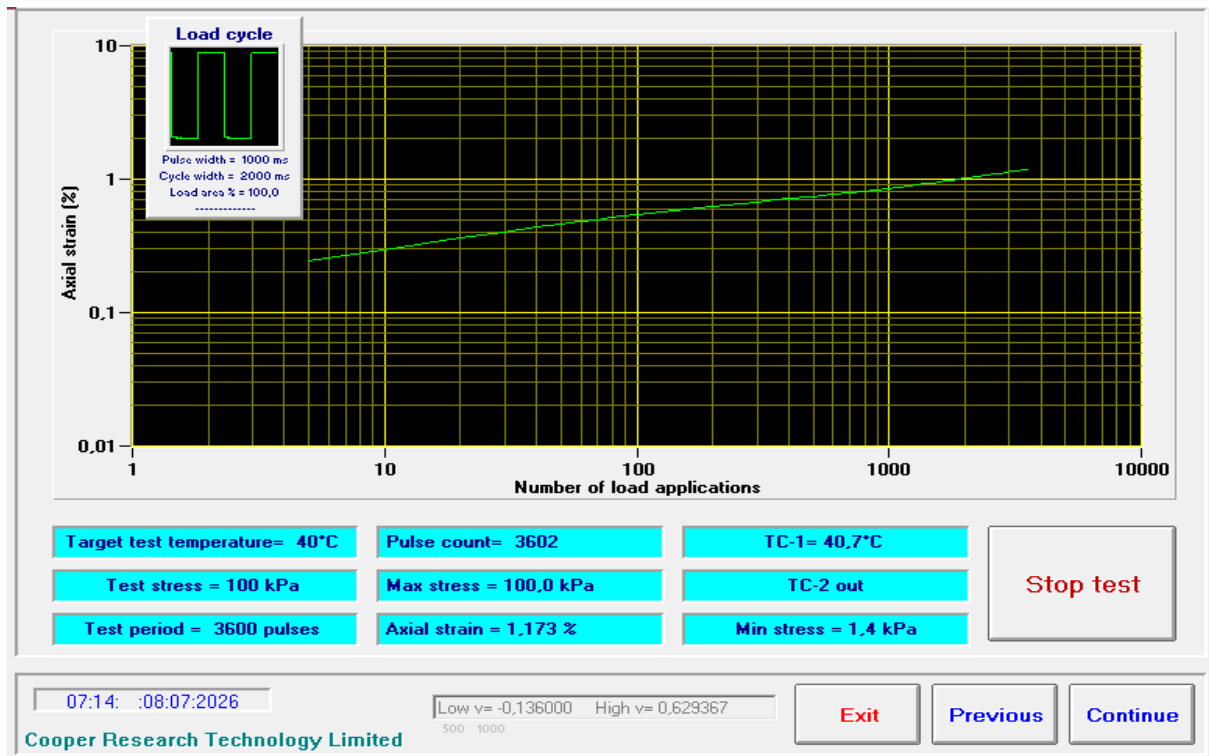
Anexo 12. Resultados de fatiga obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica aditivada con PGXpand con envejecimiento a largo plazo.

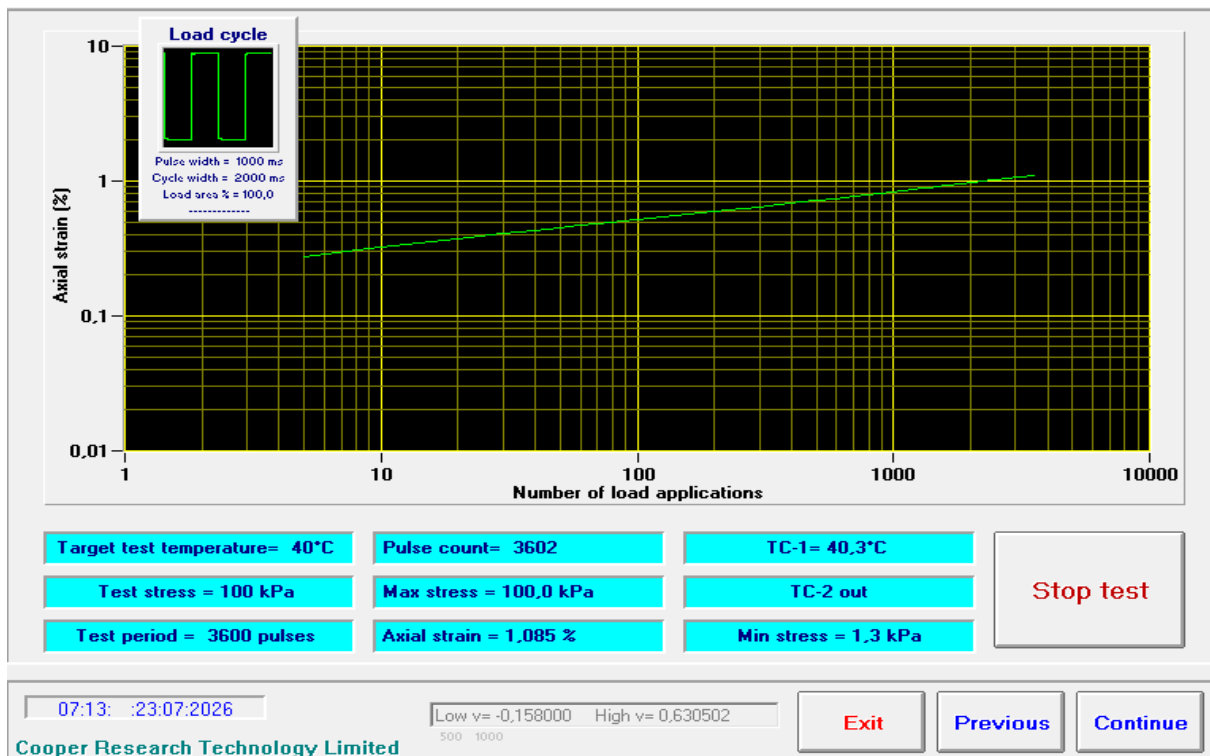




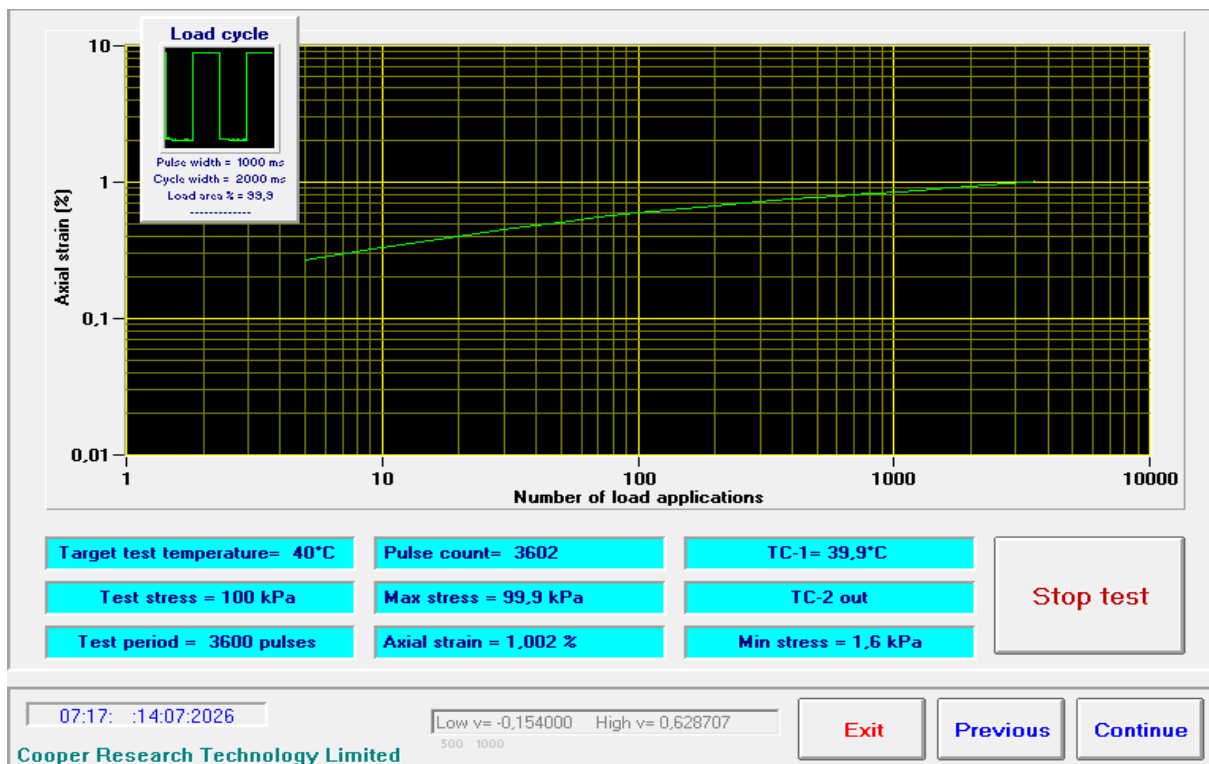
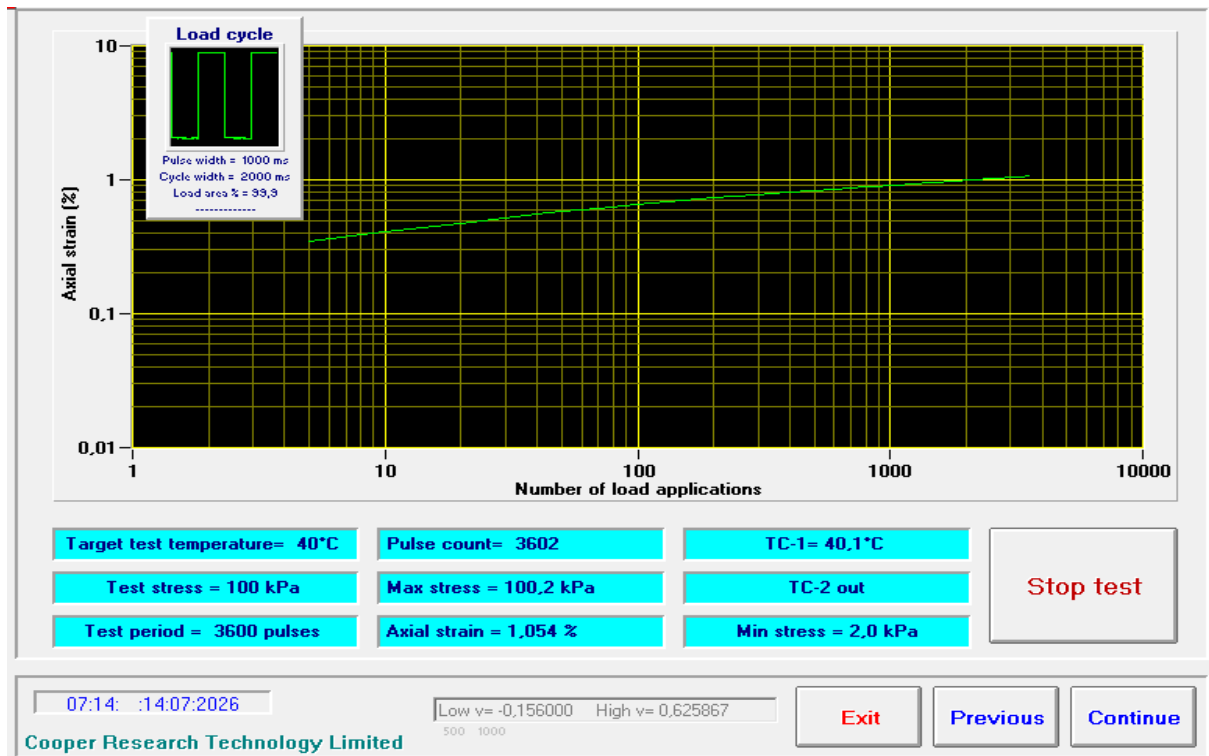


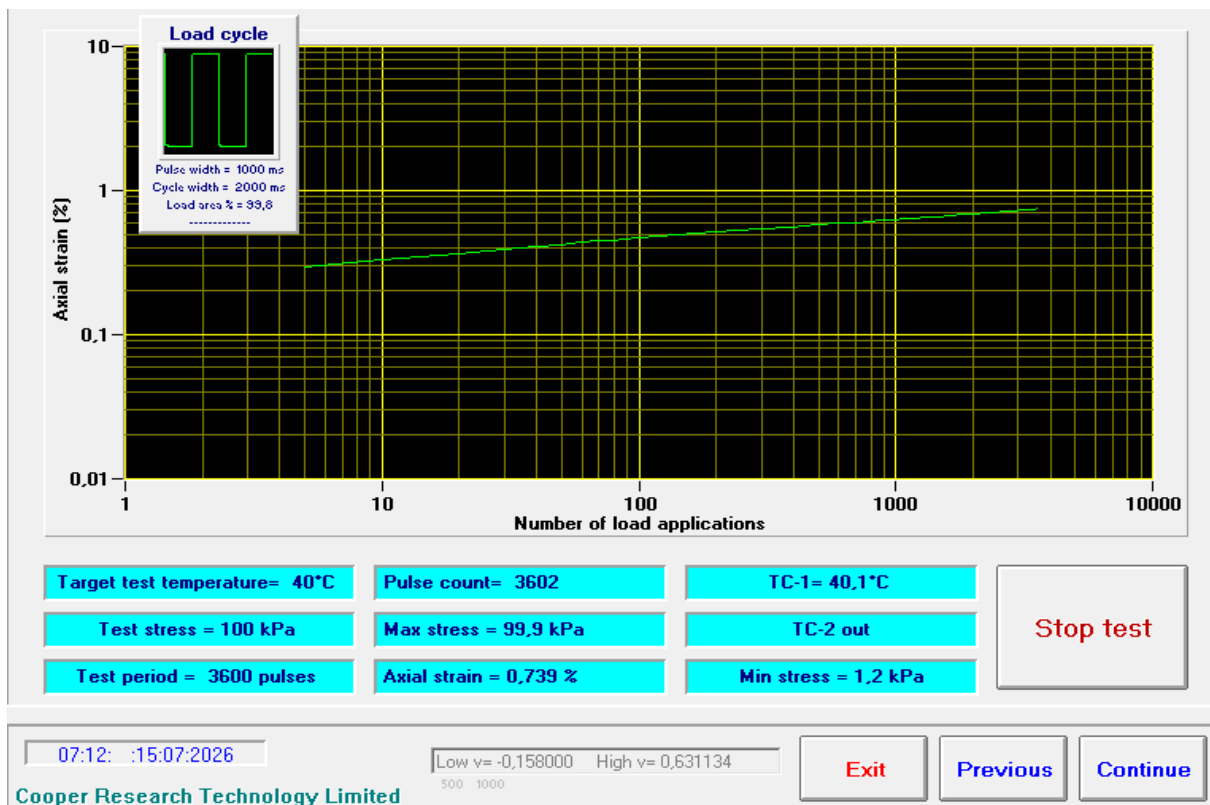
Anexo 13. Resultados de CREEP obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica de referencia con envejecimiento a corto plazo.



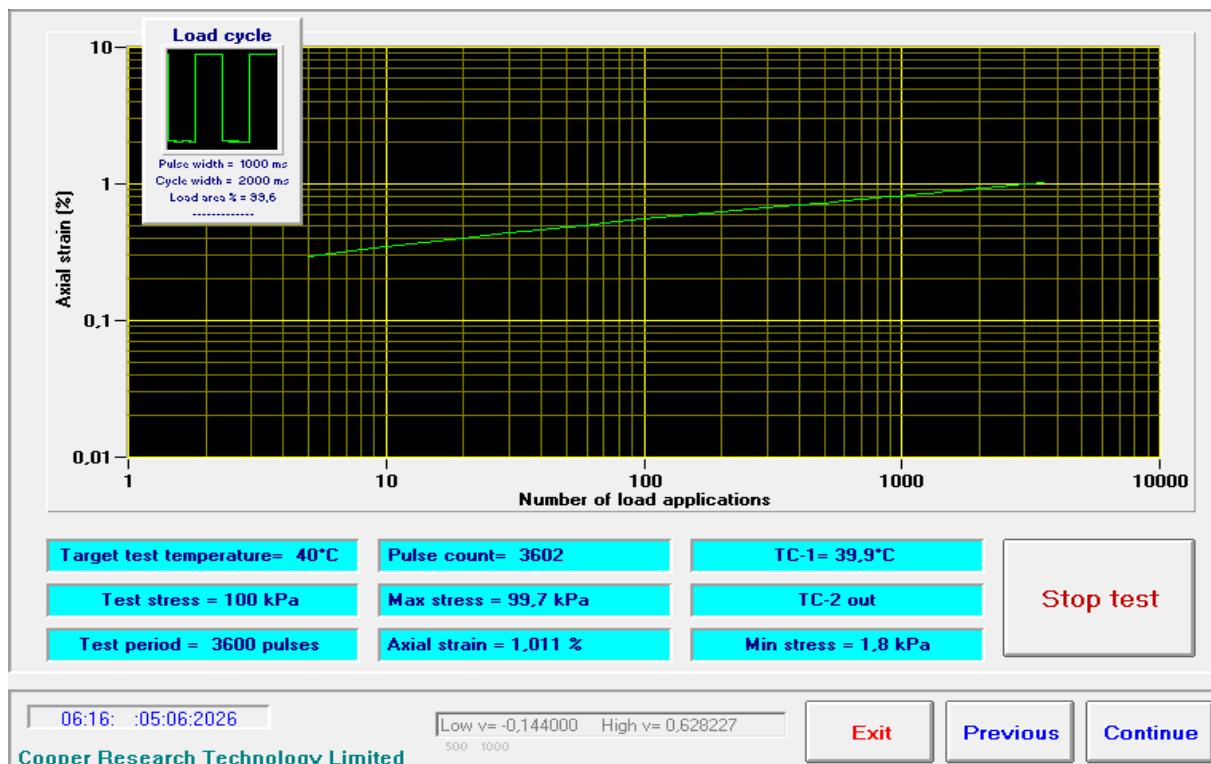
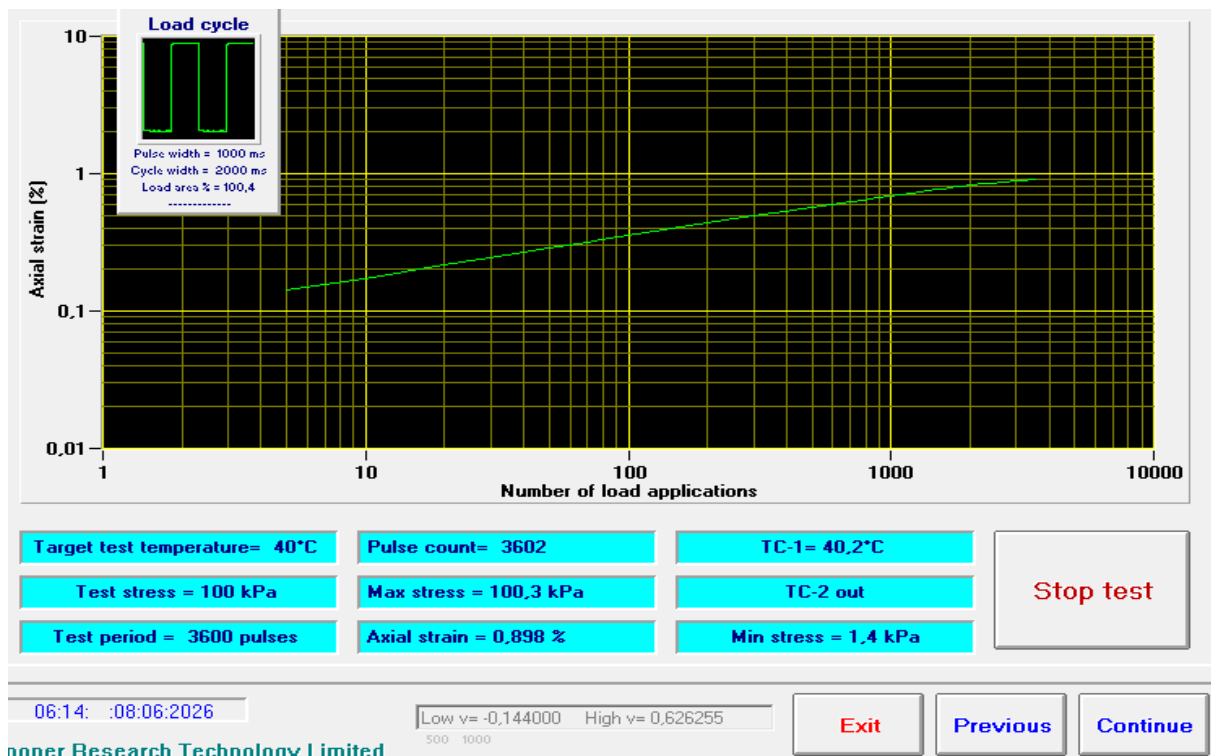


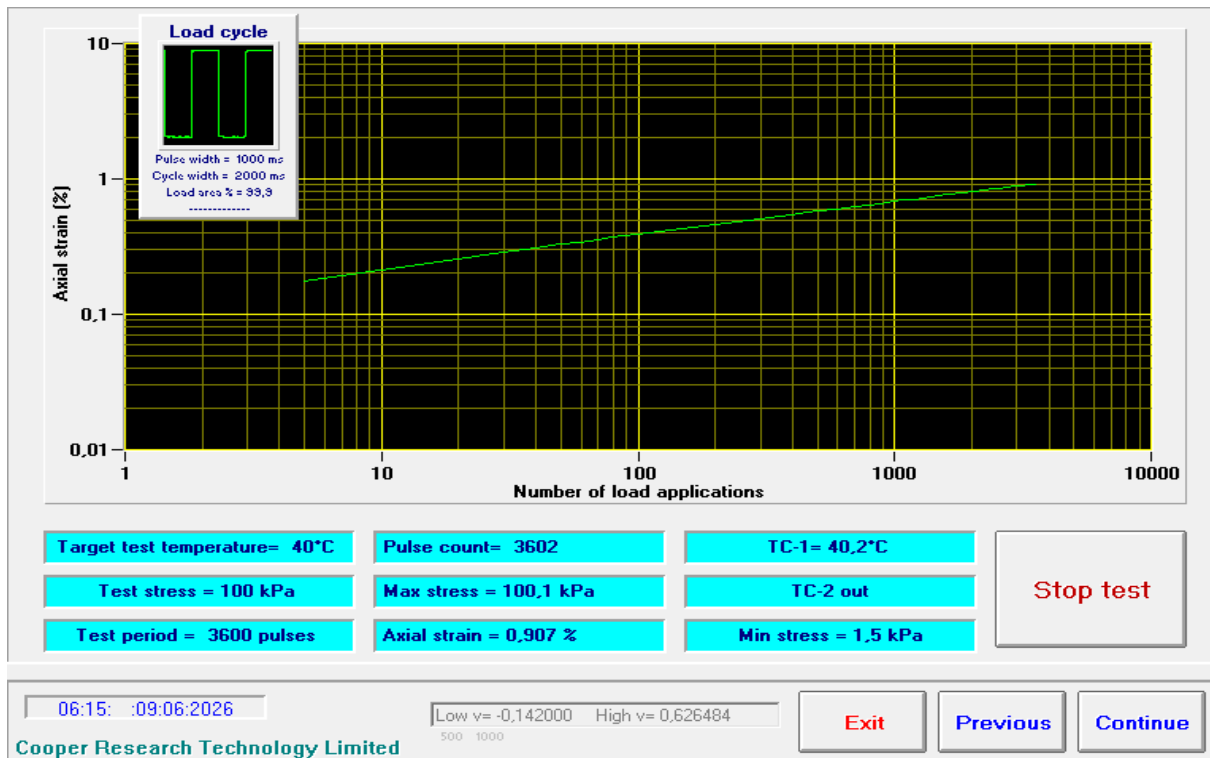
Anexo 14. Resultados de CREEP obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica de referencia con envejecimiento a largo plazo.



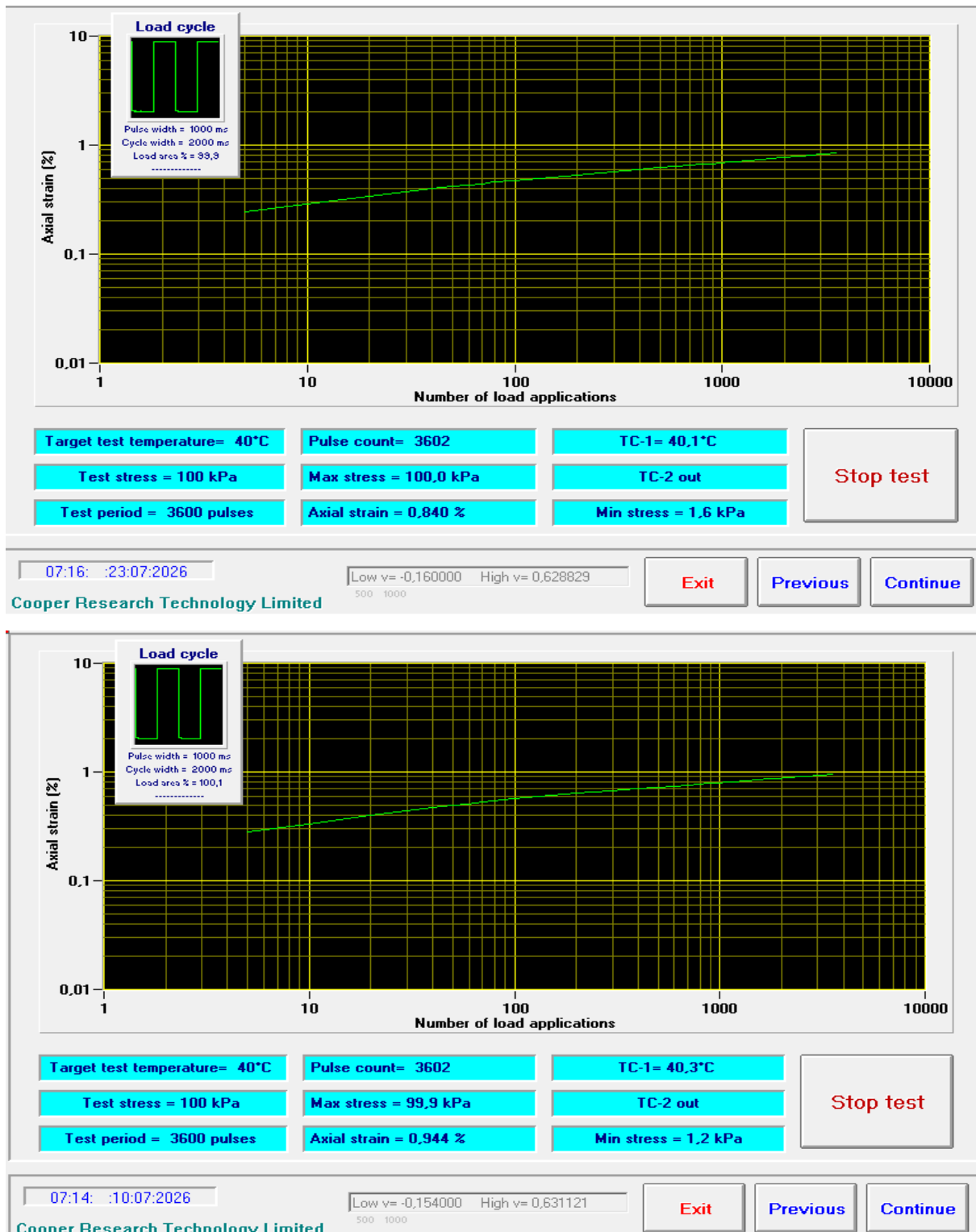


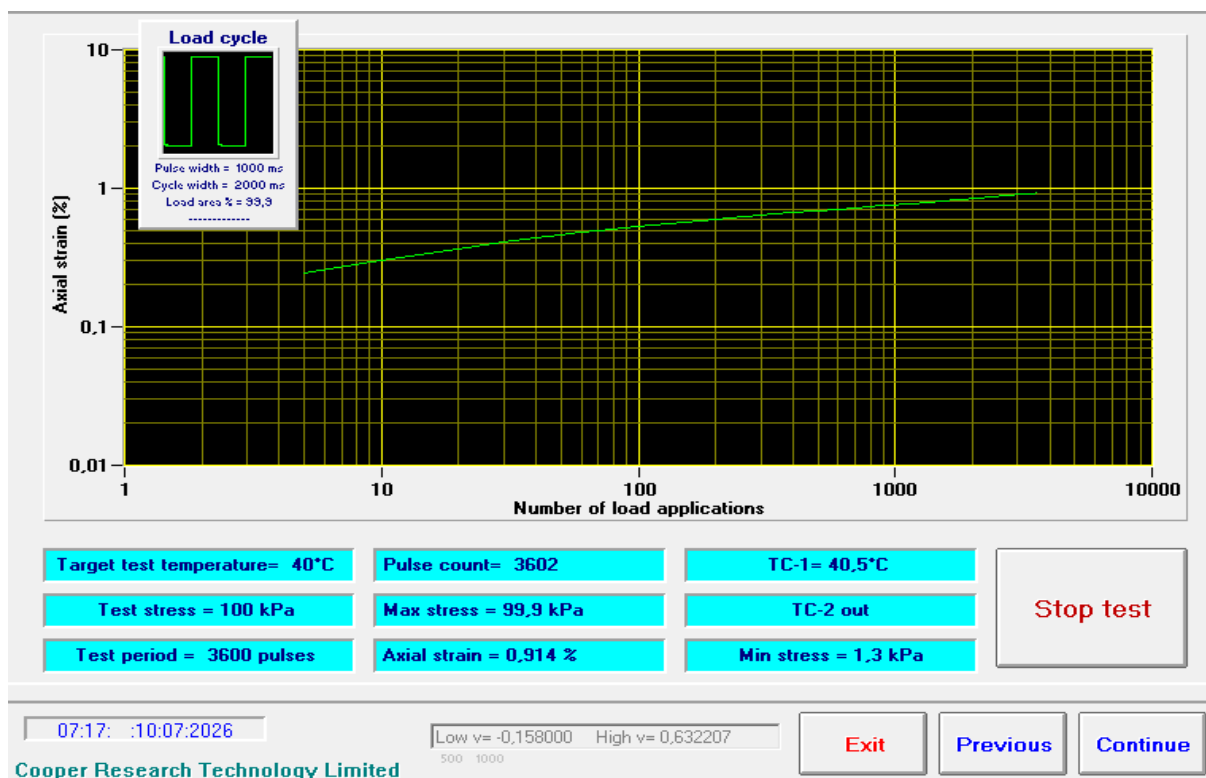
Anexo 15. Resultados de CREEP obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica aditivada con ReLIXER con envejecimiento a corto plazo.



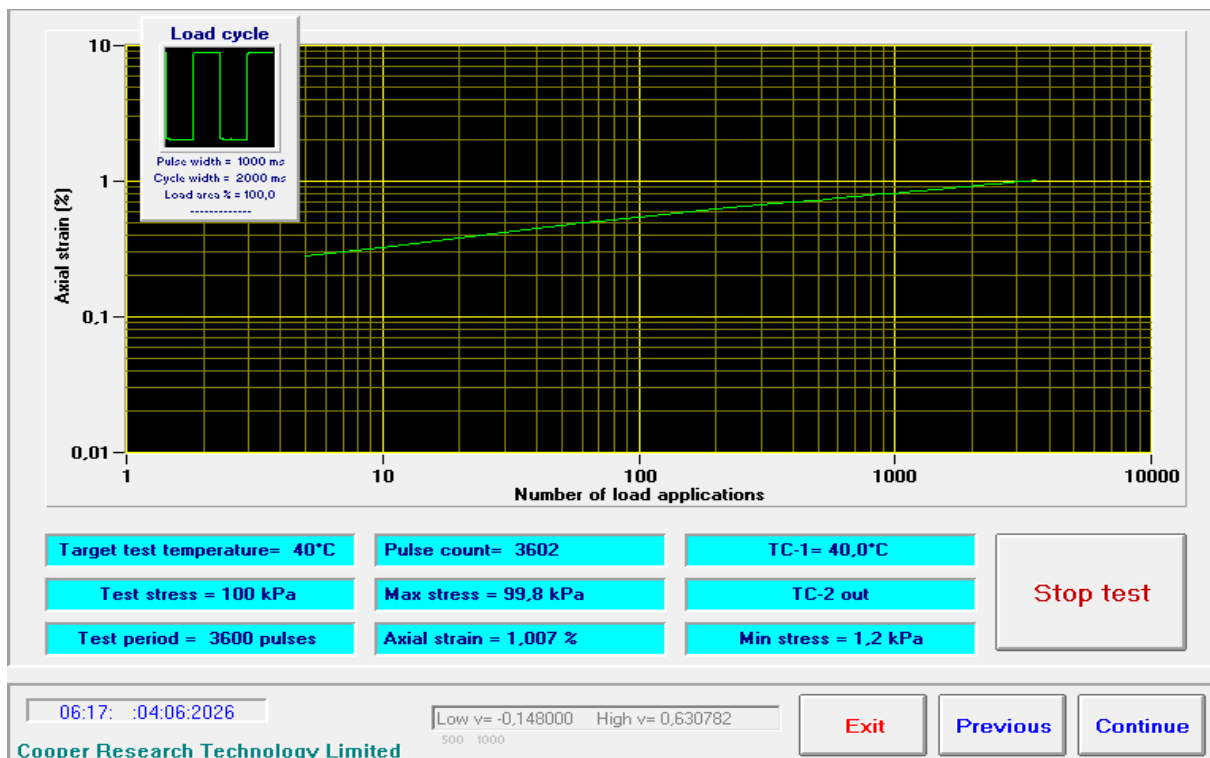
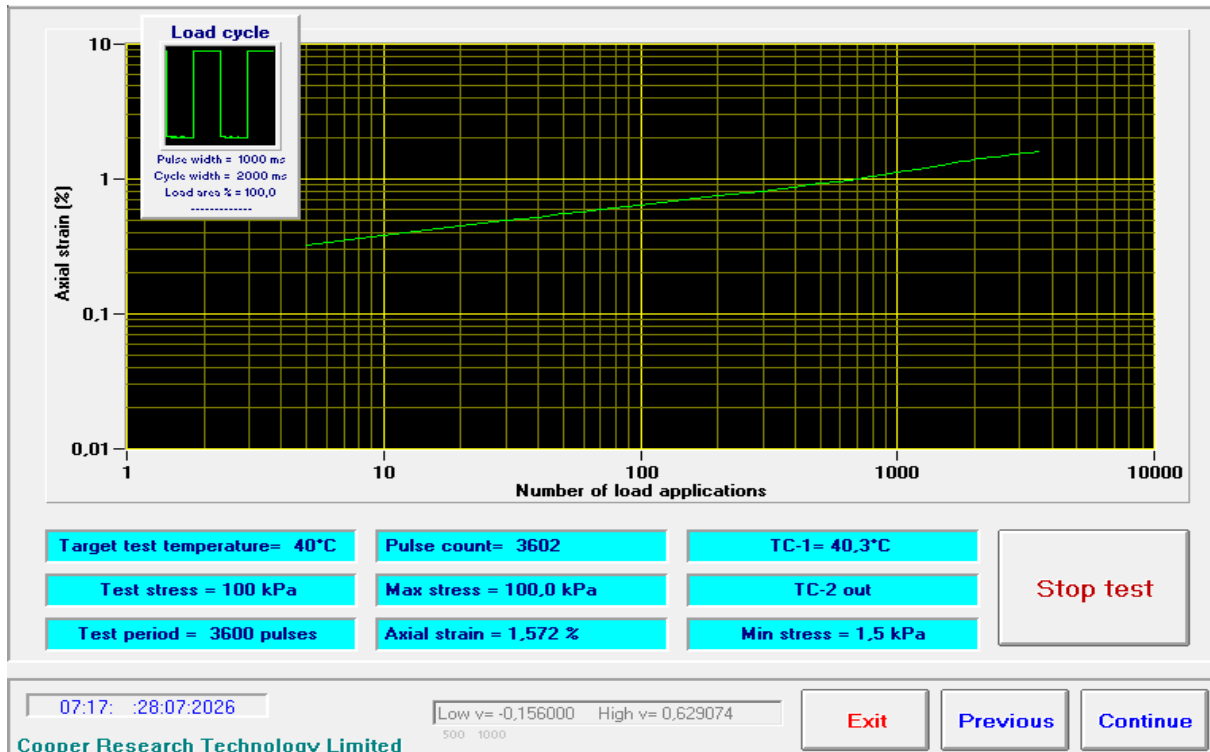


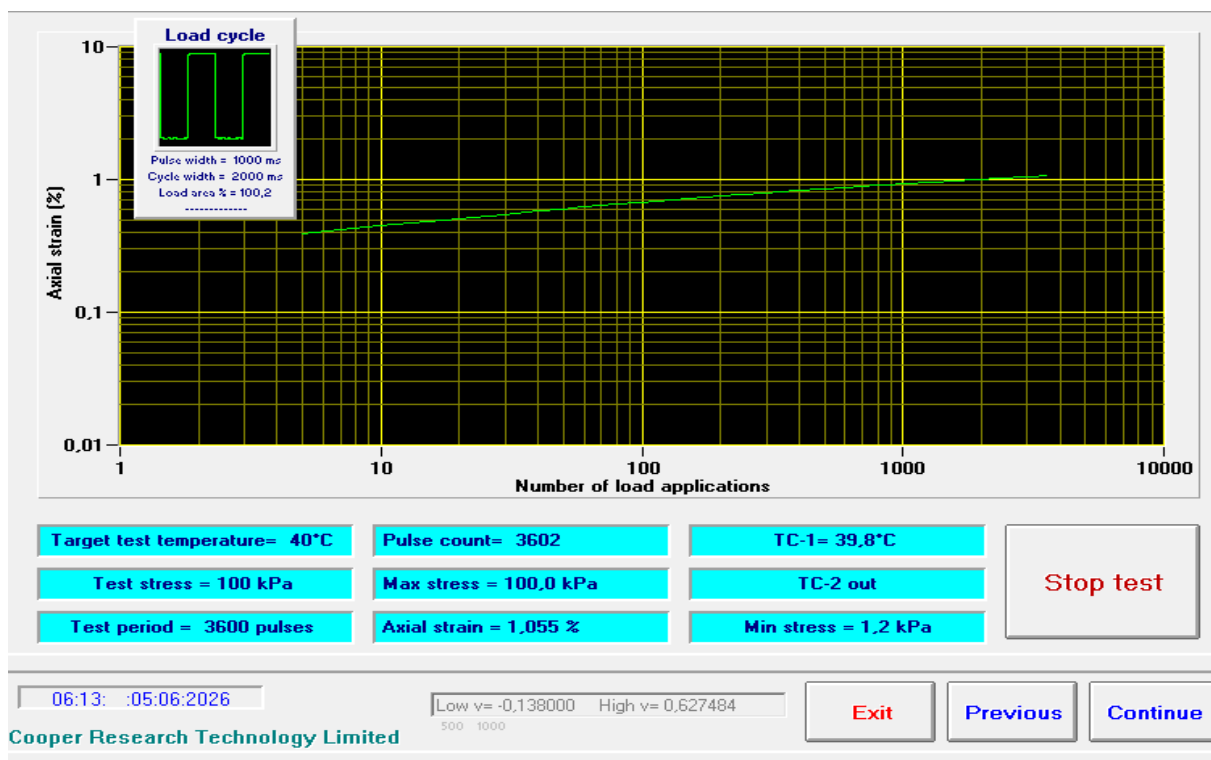
Anexo 16. Resultados de CREEP obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica aditivada con ReLIXER con envejecimiento a largo plazo.



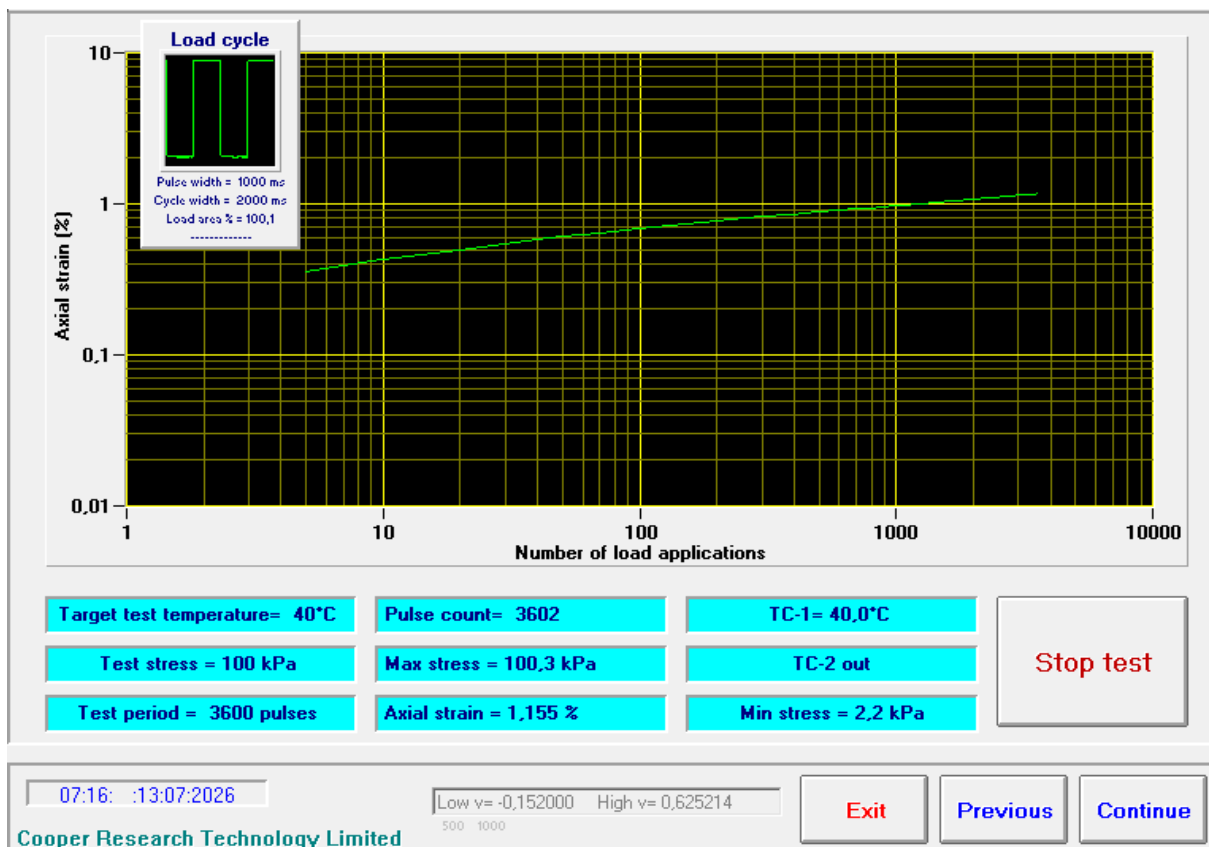
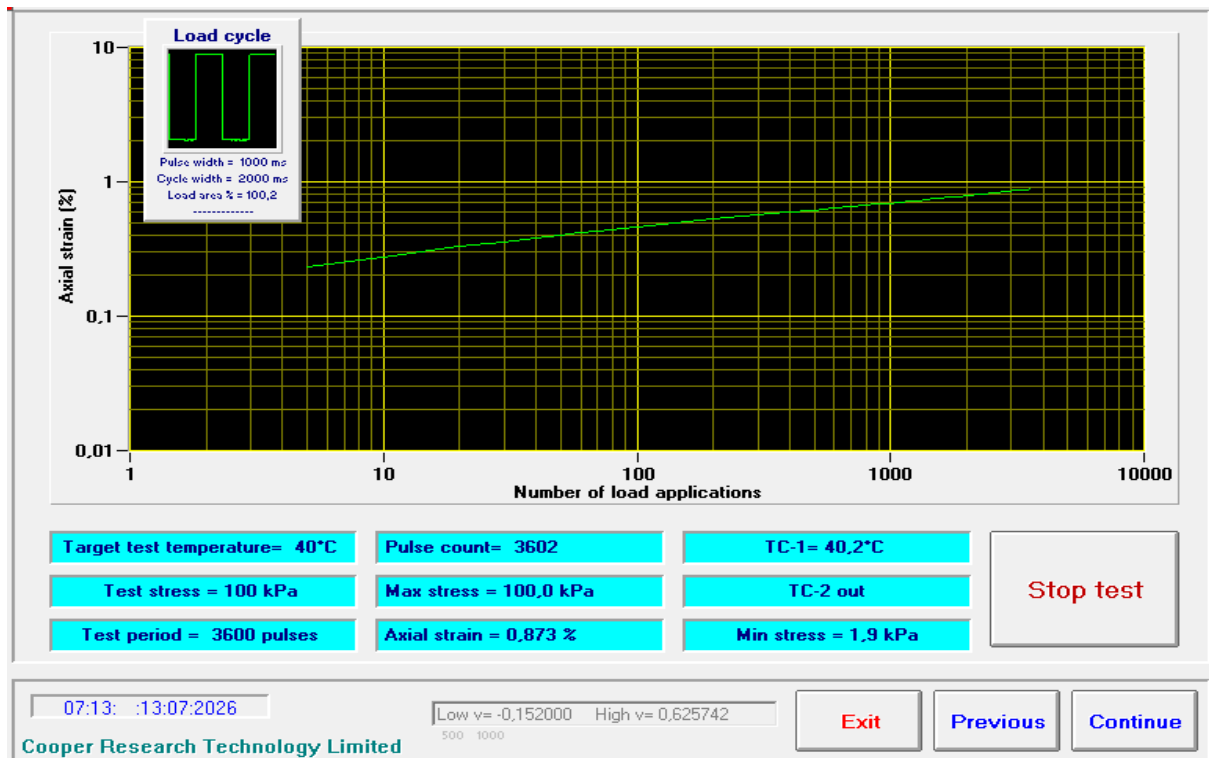


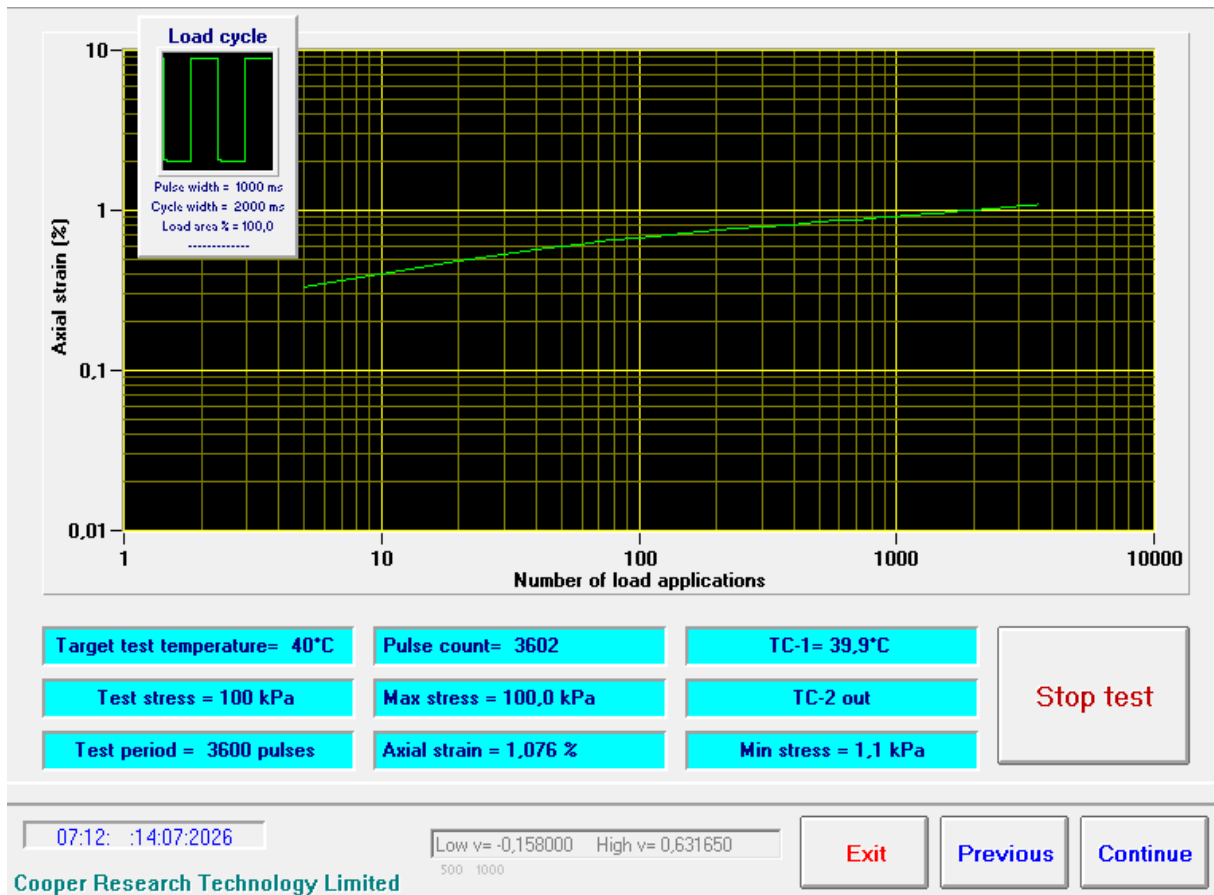
Anexo 17. Resultados de CREEP obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica aditivada con NuMIXER con envejecimiento a corto plazo.



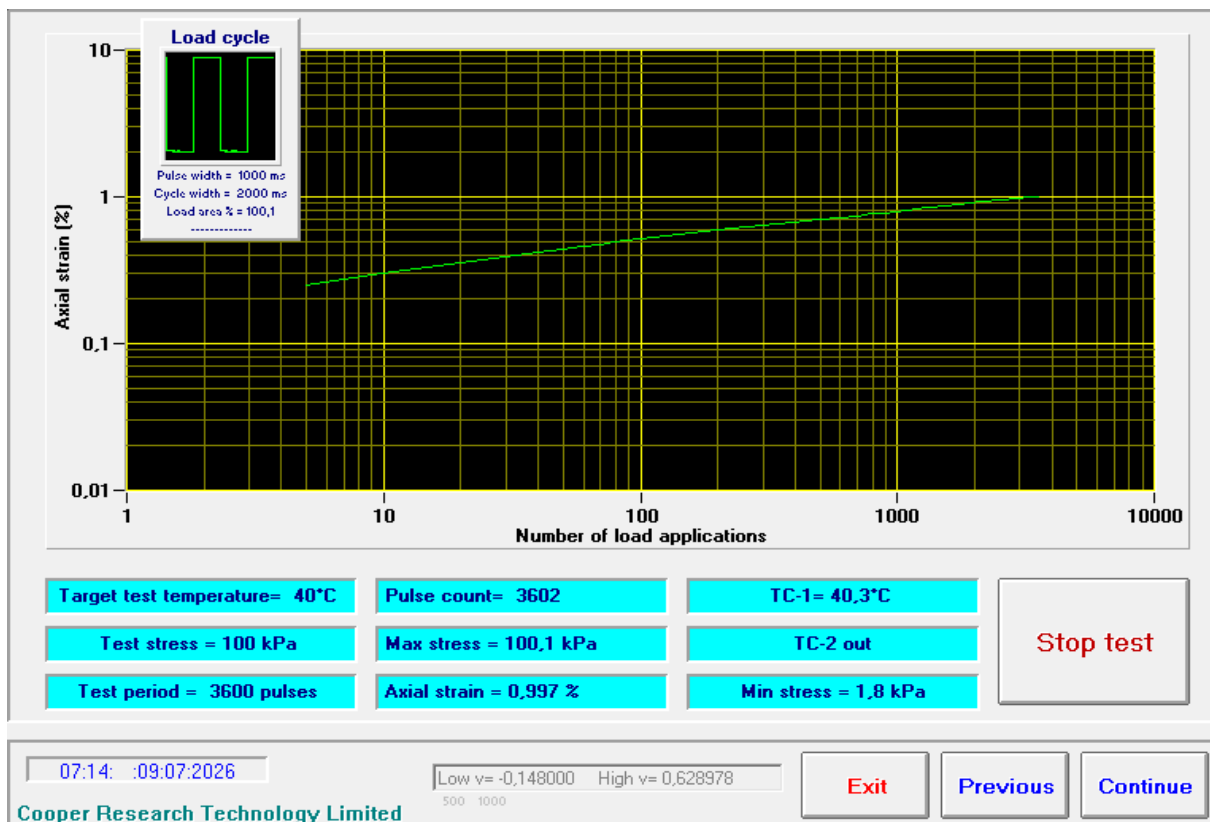
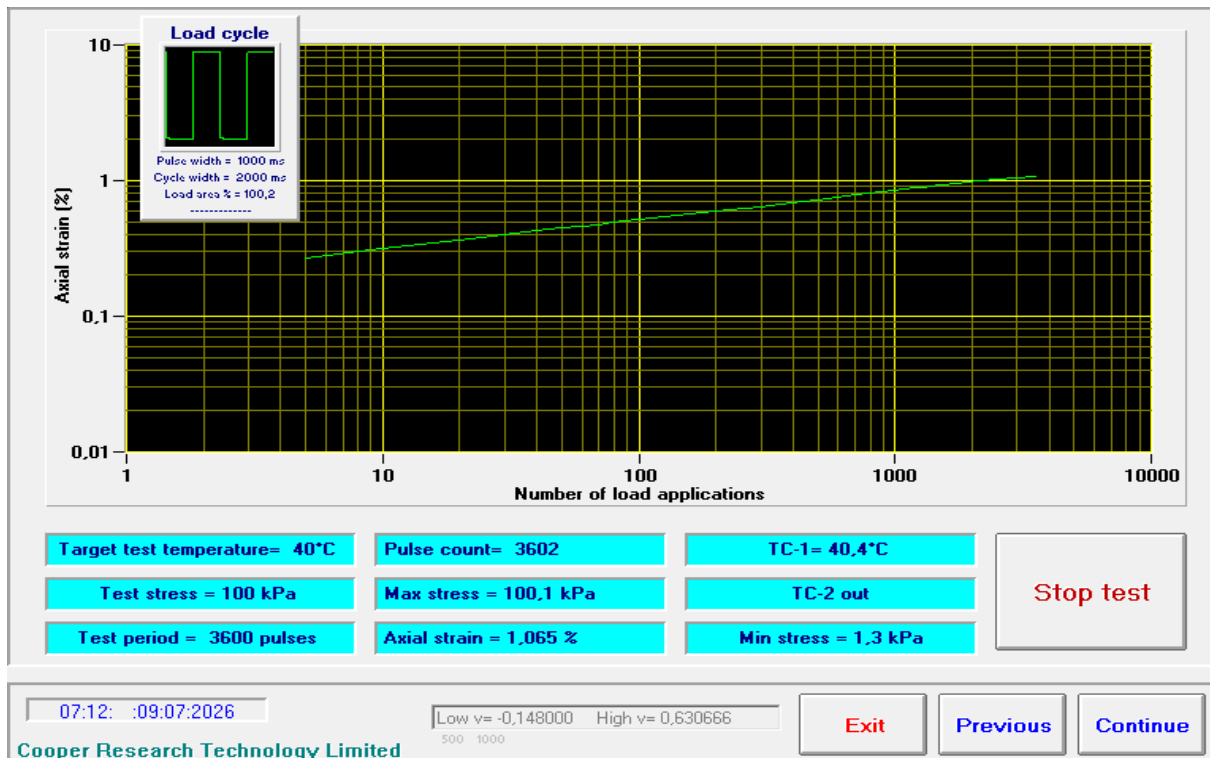


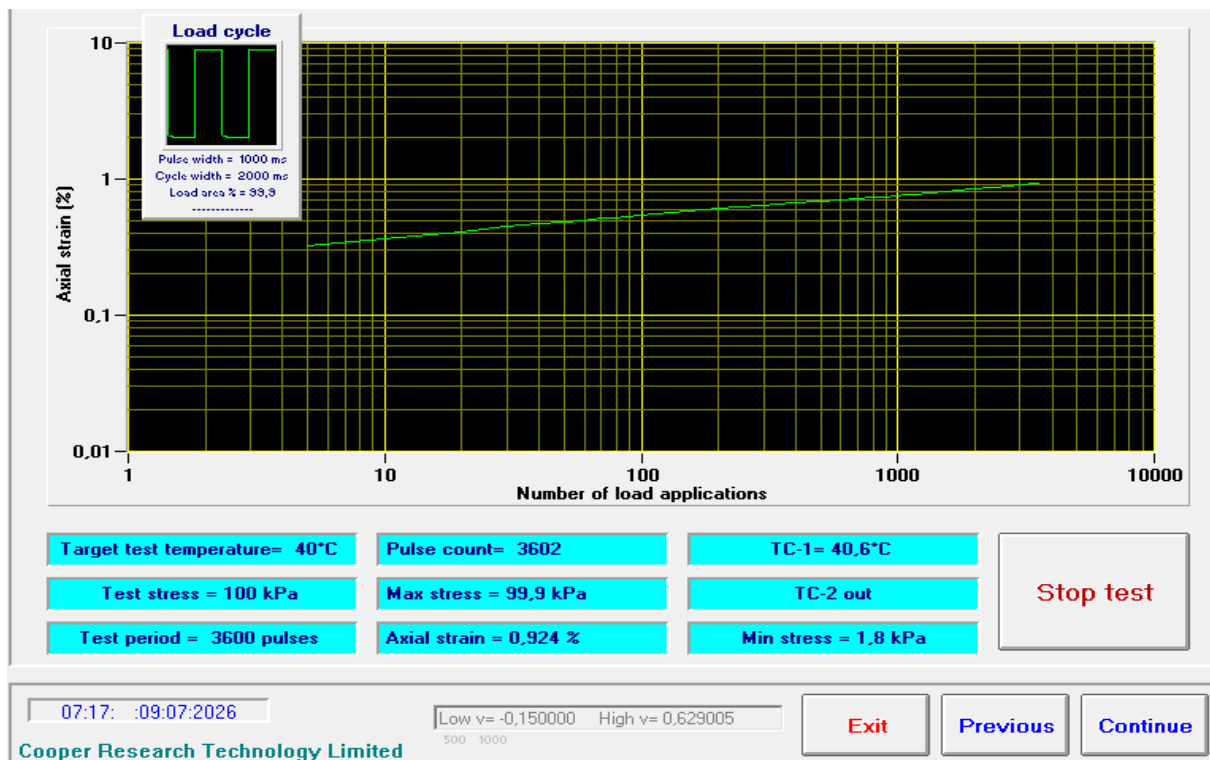
Anexo 18. Resultados de CREEP obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica aditivada con NuMIXER con envejecimiento a largo plazo.



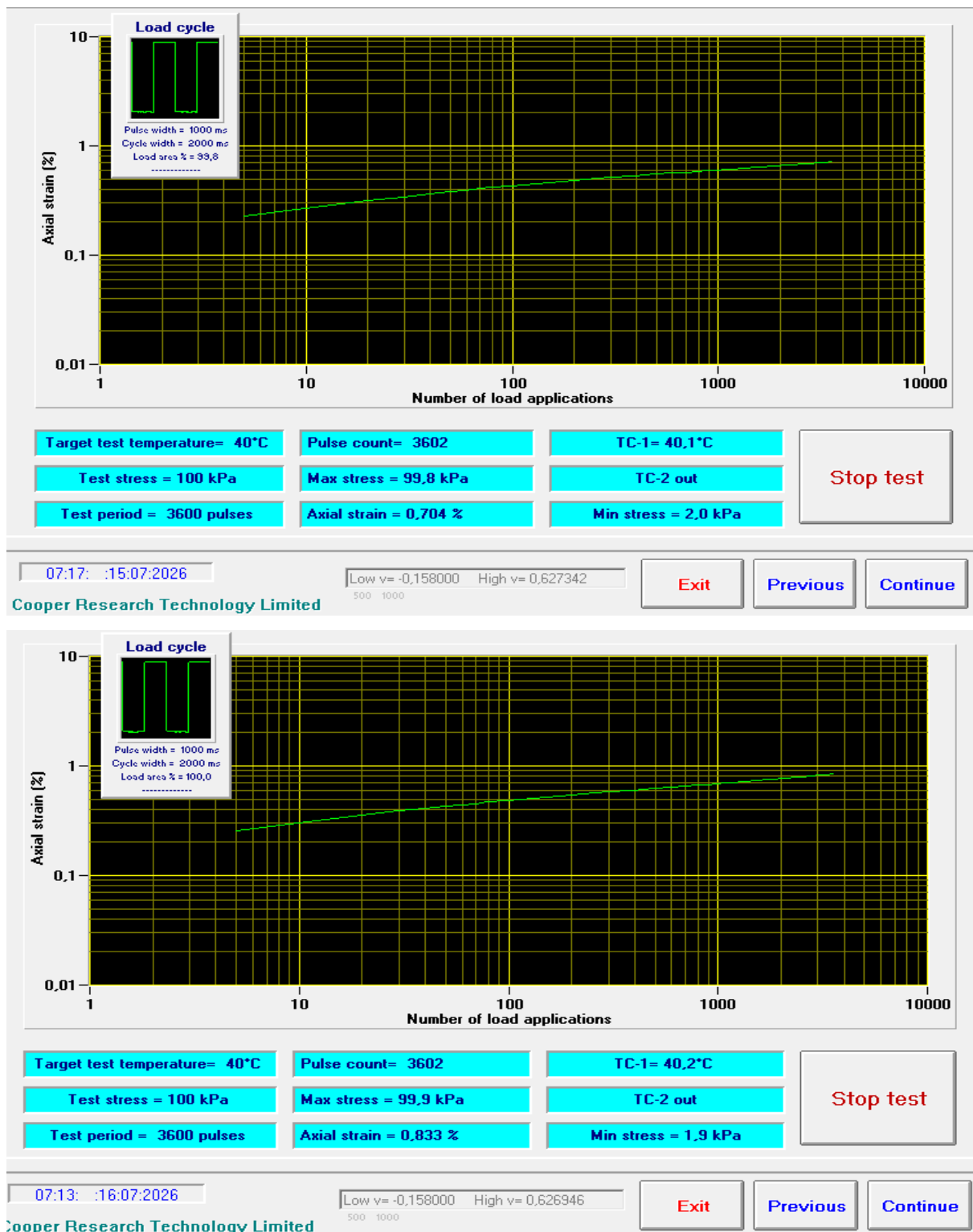


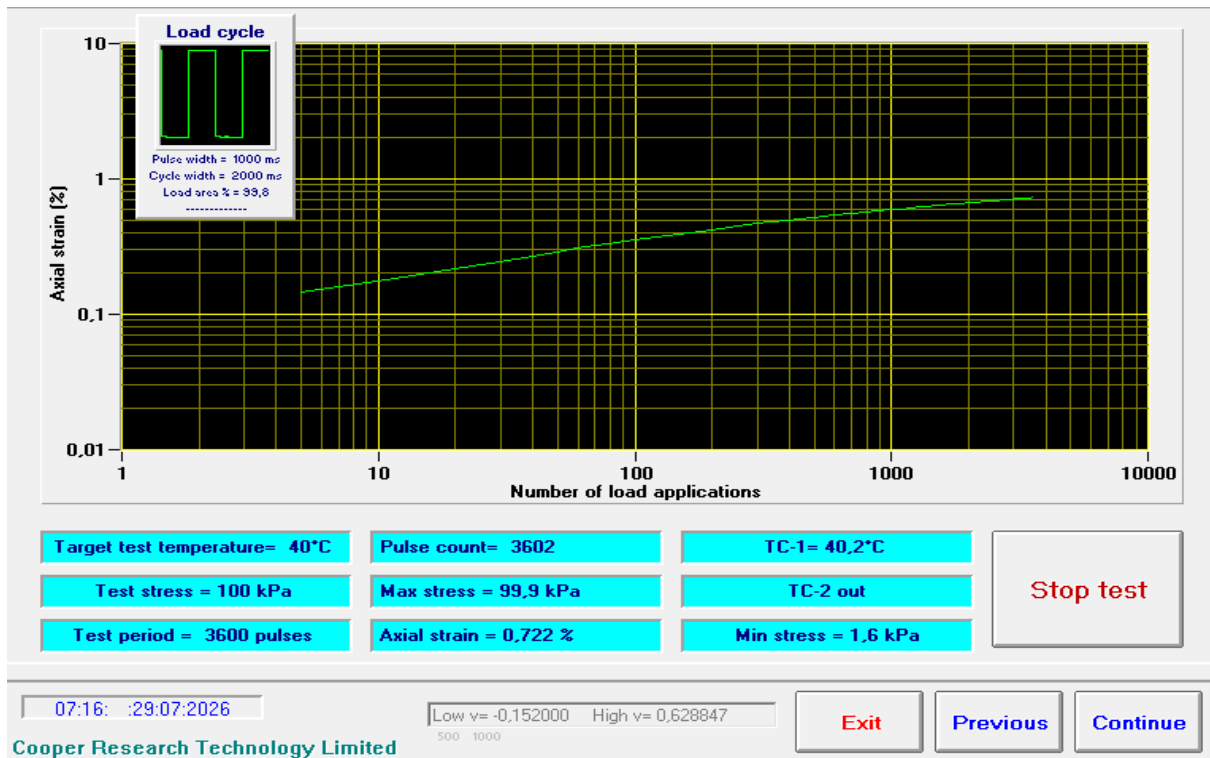
Anexo 19. Resultados de CREEP obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica aditivada con PGXpand con envejecimiento a corto plazo.





Anexo 20. Resultados de CREEP obtenidos mediante el equipo NAT NU-10 para la mezcla asfáltica aditivada con PGXpand con envejecimiento a largo plazo.







DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Nosotros, **Álvaro Sebastián Ortega Lucero y Edwin Javier Yachimba Lema**, con C.C: # **0951419183** y # **0957312507** autores del trabajo de titulación: **Estudio experimental del impacto de tres tipos de aditivos en el asfalto ecuatoriano y en una mezcla típica** previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaramos tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizamos a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, **31 de agosto de 2026**

f.

Nombre: **Álvaro Sebastián Ortega Lucero**

C.C: **0951419183**

f.

Nombre: **Edwin Javier Yachimba Lema**

C.C: **0957312507**



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA			
FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN			
TEMA Y SUBTEMA:	Estudio experimental del impacto de tres tipos de aditivos en el asfalto ecuatoriano y en una mezcla típica		
AUTOR(ES)	Álvaro Ortega Lucero Edwin Yachimba Lema		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Ing. Mera Intriago Walter, MSc.		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultad de Ingeniería		
CARRERA:	Ingeniería Civil		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero Civil		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	31/08/2026	No. DE PÁGINAS:	95 pág.
ÁREAS TEMÁTICAS:	Mezcla Asfáltica, Rejuvenecedores, Suavizantes, Polímeros.		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Asfalto ecuatoriano, rejuvenecedor, suavizante, polímero, NAT, deformación permanente, fatiga.		
RESUMEN/ABSTRACT: El envejecimiento del cemento asfáltico proveniente de la Refinería de Esmeraldas genera problemas de durabilidad y agrietamiento prematuro en los pavimentos ecuatorianos. El presente trabajo de titulación tuvo como objetivo valorar experimentalmente la incidencia de tres aditivos: un rejuvenecedor (ReLIXER), un suavizante (NuMIXER) y un polímero (PGXpand), sobre el comportamiento de una mezcla asfáltica de referencia. El trabajo experimental inició con el diseño de una mezcla mediante el método Marshall, obteniendo un contenido de asfalto del 5,55%. Posteriormente, se confeccionaron 60 briquetas distribuidas en los cuatro casos de estudio, las cuales fueron sometidas a envejecimiento a corto y largo plazo. El desempeño se evaluó mediante ensayos de módulo de rigidez, deformación permanente bajo compresión cíclica uniaxial a 40 °C y fatiga a 20 °C, utilizando el equipo NAT. Los resultados indicaron que tanto el ReLIXER como el NuMIXER redujeron la rigidez de la mezcla, mientras que el PGXpand la incrementó. En cuanto a la deformación permanente, el ReLIXER y el PGXpand redujeron la susceptibilidad al ahuellamiento manteniéndose por debajo del umbral del 1%, mientras que NuMIXER mostró mayor susceptibilidad a la deformación. Finalmente, el análisis de fatiga aplicado únicamente en las muestras envejecidas a largo plazo demostró que las mezclas modificadas mejoraron el comportamiento de la mezcla asfáltica de referencia frente a cargas cíclicas, destacando el NuMIXER al soportar el mayor número de ciclos antes de la falla. Se concluye que estos aditivos representan una alternativa viable para mejorar el desempeño y contrarrestar las patologías del asfalto local.			
ADJUNTO PDF:	SI		
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593 998275648 +593 991821914	E-mail: alvarozxc2@gmail.com edwinyachimba77@gmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):	Nombre: Clara Glas Cevallos Teléfono: +593 984616792 E-mail: clara.glas@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			